

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи



Зарзура Фавзи Хамед Фавзи

Методика прогнозирования деформаций  
вантовых мостов по данным ГНСС-измерений

25.00.32 - Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
Мазуров Борис Тимофеевич

Новосибирск – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	9
1.1 Виды деформации и классификация инженерных сооружений.....	9
1.2 Обзор современных методов и приборов измерения.....	10
1.3 Вантовые мосты как пример инженерно-технических объектов .....	16
1.4 Примеры проведения мониторинга инженерных сооружений с использованием ГНСС-технологий.....	24
2 ПРИМЕНЕНИЕ ГНСС ДЛЯ МОНИТОРИНГА .....	29
2.1 Метод ГНСС-позиционирования.....	29
2.2 Требования к системе мониторинга мостов .....	31
2.3 Выбор метода ГНСС.....	37
2.4 Кинематика реального времени (RTK).....	39
2.5 Аппаратура и программное обеспечение.....	42
2.6 Ошибки в результатах ГНСС-измерений.....	43
2.7 Выводы.....	55
3 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ГНСС-СЕТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ СЕТЕЙ ЕГИПТА, КУВЕЙТА И МЕККИ).....	56
3.1 Сеть Египта .....	56
3.2 Сеть Кувейта .....	67
3.3 Сеть Мекки.....	71
3.4 Выводы.....	77
4 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ.....	79
4.1 Модели деформации .....	79
4.2 Математические алгоритмы.....	81
4.3 Выводы.....	95

5 МОНИТОРИНГ МОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС.....	97
5.1 Мост NanGu (сбор данных с помощью ГНСС)....	97
5.2 Мост Хуанпу .....	102
5.3 Экспериментальные исследования изменений по высоте критических точек мостов .....	106
5.4 Конечно-элементная модель для моста (Finite Element Model).....	108
5.5 Применение метода регрессии .....	109
5.6 Модель мониторинга и прогнозирования.....	110
5.7 Выводы.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ПРОГРАММНЫЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА (ШАГ 1)....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ПРОГРАММНЫЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА (ШАГ 2).....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ФИЛЬТР АДАПТИВНОГО ПРОЦЕССА...	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ИСКАЖЕНИЕ КООРДИНАТ ГНСС.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) ПРОГРАММЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) ПРОГРАММА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ И (обязательное) ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕТЬ ЕГИПТА....	161

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Мосты являются важными транспортными узлами и играют большую роль в социально-экономическом развитии городов и регионов. В мире насчитывается почти 250 000 построенных мостов, которые требуют обследования и ремонта, а состояние их конструкций необходимо подвергать периодическому и систематическому контролю. Важность данной проблемы подтверждена регламентами федерального значения. Мосты в ходе их эксплуатации испытывают нагрузки разного вида: от движущегося транспорта, ветра, высоких или низких температур и т.п. Наиболее чувствительны к различным внешним воздействиям вантовые мосты ввиду их конструктивных особенностей. Поэтому именно для данного типа инженерных конструкций особенно важен выбор метода регулярного наблюдения смещений контролируемых точек. В настоящее время признанным технологическим инструментом наблюдения за инженерными сооружениями, в частности мостами, является круглосуточный мониторинг как непрерывный процесс наблюдения за деформационными параметрами объекта и их регистрации. Для этого могут использоваться различные измерительные системы, из которых выделим имеющие множество преимуществ глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). На сегодняшний день они стали альтернативой классическим геодезическим методам, часто опережая их по точности и экономической эффективности. Большое преимущество ГНСС-мониторинга – его непрерывный режим работы в реальном времени. Несколько приемников ГНСС, установленных на наблюдаемом сооружении, могут существенно улучшить статистическую состоятельность и несмещенность оценок кинематических параметров, получаемых в результате наблюдения и последующей математической обработки.

Важным необходимым элементом мониторинга является прогнозирование. Первично сложность математической обработки вызвана большим объемом данных ГНСС-измерений. Далее, для достоверных результатов получения оператив-

ного и краткосрочного прогноза должна быть выбрана из нескольких альтернативных наиболее адекватная модель. И при необходимом учете разнообразных факторов, влияющих на объект и систему наблюдений, создание прогнозной модели является нетривиальной задачей, не имеющей в настоящее время однозначного решения и являющейся актуальной.

*Степень разработанности темы.* В достижение высокого уровня развития методов обеспечения строительства и эксплуатации инженерных сооружений внесли свой вклад известные специалисты в области геодезии: Асташенков Г. Г., Бойко Е. Г., Гуляев Ю. П., Гридчин А. Н., Жуков Б. Н., Карпик А. П., Макаренко Е. А., Ямбаев Х. К., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Шануров Г. А., Shafri H. Z., Enge P. K., Van Dierendonck A. J., Meng X., Jager R. и др. Значительный вклад в развитие вопросов безопасности гидротехнических сооружений внесли Кафтан В. И., Малько А. В., Сахаров Г. Г., Шахов Н. А., Аkyilmaz O., Kaloop M. R., Gairns C. и др. Вопросы оперативного и краткосрочного прогнозирования изучали Дементьев Ю. В., Ивахненко А. Г.

Ранее конструкции вантовых мостов исследовали многие специалисты, однако при проведении оперативных и краткосрочных измерений никто из них не рассматривал влияние на характер деформаций ветра, температуры, транспортных нагрузок и влажности в совокупности. Только Kaloop M. R. анализировал влияние на смещения конструкций вантовых мостов ветра и нагрузок от движущегося транспорта одновременно. При этом он получил корреляцию данных и результатов прогнозирования 0,62. Кроме того, ранее никто из исследователей не использовал непосредственно в процессе прогнозирования смещений информационные нейронные сети.

Существующие методы и методики соответствуют уровню геодезических измерительных систем десятилетней и более давности. Современные технологии координатных определений в сочетании с уровнем информационной (компьютерной) поддержки ставят новые задачи как оптимизации наблюдений, так и их корректной математической обработки. Поэтому, в частности, вопросы разработки и

усовершенствования математических методов, методики и создание алгоритмов обработки данных о деформационном состоянии мостов (вантовых в том числе), полученных посредством ГНСС-мониторинга, являются актуальными.

*Цель работы* заключается в разработке методики обработки данных ГНСС-мониторинга для оперативного и краткосрочного прогнозирования кинематики и динамики сложных природно-технических систем (на примере вантовых мостов).

*Основные задачи исследования.* Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать методики координатных определений по технологиям ГНСС, и существующие способы их улучшения;
- выполнить анализ и обосновать выбор методики оперативного и краткосрочного прогнозирования смещений и деформаций, наиболее адекватно учитывающей различные внешние воздействия на объект ГНСС-мониторинга;
- разработать и реализовать алгоритм методики оперативного и краткосрочного прогнозирования смещений и деформаций, как кинематических, так и динамических, в виде программы и выполнить его проверку на реальных данных ГНСС-мониторинга вантовых мостов.
- разработать методику, позволяющую обработку больших объемов данных, существенно повышающих достоверность прогнозирования.

*Научная новизна проведенных исследований* заключается в том, что:

- получены математические регрессионные модели для прогнозирования смещений и деформаций под действием ряда погодных факторов (ветра, температуры, влажности);
- представлена разработанная методика прогнозирования деформации наблюдаемых точек мостов, испытывающих переменную транспортную нагрузку, с использованием 13 приемников;
- определены блоки информационных нейронных сетей (системы уравнений) для каждого ГНСС-приемника, используемого в мониторинге вантовых мостов, с использованием разработанной программы;

– разработана методика и алгоритмы математической обработки данных ГНСС-измерений с целью оперативного и краткосрочного прогнозирования смещений и деформаций, учитывающая влияние изменений ветра, температуры, влажности, транспортных нагрузок и др.

*Теоретическая и практическая значимость* работы состоит в том, что разработаны новые уникальные методики определения по данным ГНСС-измерений достоверных прогнозных моделей деформационного состояния инженерных объектов, позволяющие учитывать влияние на них различных внешних воздействий. Результаты работы позволят на основе оперативного и статистически корректного анализа данных ГНСС-измерений улучшить качество проектирования, контроля при строительстве и обеспечения безопасности инженерных объектов при их эксплуатации. Практические разработки реализованы в виде комплекса вычислительных программ.

*Методология и методы исследования.* При выполнении исследований использовались теория вероятностей, методы вычислительной математики и статистической обработки результатов измерений, а также теория ошибок измерений и методы математического моделирования и анализа. В качестве программного обеспечения использовались программы MATLAB 2014 и MATHCAD 14, программные продукты для получения и обработки данных LGO и High Target; программные комплексы MICROSOFT EXCEL 2007 и AUTOCAD 2010.

*Положения, выносимые на защиту:*

– математические (регрессионные) модели позволяют связать смещения и деформации наблюдаемых точек вантового моста с рядом погодных факторов (ветром, температурой, влажностью);

– результаты вычислительных экспериментов подтверждают преимущество нейронных сетей при оперативном и краткосрочном прогнозировании смещений и деформаций инженерных объектов по большим объемам данных ГНСС-измерений.

– алгоритмы и их практическая реализация в виде комплекса вычислительных программ позволяют прогнозировать динамику положения сооружения, оценивают состояние конструктивных элементов в зависимости от времени, места, силы воздействия различных нагрузок по данным ГНСС-измерений;

– при измерениях с применением одной станции (взамен нескольких базовых) точность координирования при коротких расстояниях (до 10 км) практически не снижается, а для системы OmniSTAR, применяемой в странах Среднего Востока, время наблюдений уменьшается на десятки процентов.

*Степень достоверности и апробация результатов.* Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: IX Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», 15–26 апреля 2013 г., Новосибирск: Международном научном конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»; X Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Международном научном конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»; XI Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015», 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Международном научном конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия».

Разработанная в ходе диссертационных исследований методика получения прогнозных моделей деформаций вантовых мостов внедрена в учебный процесс Сибирского государственного университета геосистем и технологий РФ.

## 1 СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

### 1.1 Виды деформации и классификация инженерных сооружений

Мониторинг, который является процессом автоматизированного круглосуточного наблюдения и фиксации отдельных параметров важных и опасных объектов, с каждым годом приобретает все большее значение. Цель мониторинга – предупредить чрезвычайные ситуации и повреждения или разрушения объектов. Мониторинг помогает отследить деформации и сдвиги объекта и отдельных его элементов, что даёт возможность предотвратить наступление негативного события.

Как отмечал С. Cairns, важными факторами при выборе той или иной системы мониторинга являются стоимость, эффективность и надежность схемы мониторинга [62]. Исторически для мониторинга деформаций крупных сооружений применялись самые разные методы. С появлением и совершенствованием новых технологий и методов разрабатываются современные способы и методики мониторинга.

Деформации сооружений делятся на медленные и быстрые [50]. Медленные деформации происходят от тепловой и сжимающей нагрузки, постоянных нагрузок, тектонической деятельности и т.д. Быстрые деформации происходят от сильной ветровой нагрузки, нагрузки от транспортных средств, сейсмического воздействия. Эти два вида могут быть определены расстоянием или точками перемещения, угловыми перемещениями и напряженными стрессовыми условиями.

При изучении деформаций сооружений геодезическими методами возникает необходимость назначения или расчета точности измерений [11, 7]. В таблице 1 приведены классификация инженерных сооружений и их нормативные требования точности измерений [51].

По мнению специалистов, точность измерения деформаций имеет два аспекта. Один из них – исходная точность определения самой величины деформации, а второй – точность непосредственно геодезических измерений [7, 6].

Таблица 1 – Классификация инженерных сооружений и их нормативные требования точности измерений [51]

Классификация инженерных сооружений		
Первый класс Уникальные инженерные сооружения	Второй класс Ответные инженерные сооружения	Третий класс Прочие инженерные сооружения
Высокоточные геодезические измерения	Высокоточные и точные геодезические измерения	Точные геодезические измерения
Непрерывный мониторинг	Непрерывный и прерываемый мониторинг	Непрерывный мониторинг
Требуемая точность измерений: $m_h \leq (0,02: 0,15) \text{ мм}$	Требуемая точность измерений: $m_h \leq (0,1: 0,5) \text{ мм}$	Требуемая точность измерений: $m_h \geq (0,5: 1,0) \text{ мм}$
Примеры: ускорители; заряженные частицы; атомные электросети; гидравлические электросети, радиоантенны.	Примеры: заводы, тепловые электросети, тоннели, длительное время (более 100 лет) находящиеся в эксплуатации.	Примеры: другие заводы цеха (земляные сооружения)

## 1.2 Обзор современных методов и приборов измерения

Технологии измерения и контрольно-измерительное оборудование для мониторинга деформаций традиционно делят на две группы [51, 35]:

- геодезические измерения, в состав которых входят традиционные, фотограмметрические, спутниковые и специальные измерения;
- геотехнические измерения местных деформаций с использованием лазеров, инклинометров и т.п.

Каждая группа измерений имеет свои достоинства и недостатки. Так, R.L. Vanatwerp [99] отмечает, что геодезические измерения дают исчерпывающую информацию о поведении деформированного сооружения.

Основными современными методами измерения деформаций являются:

- линейно – угловые измерения;
- дифференциальное нивелирование;
- фотограмметрические методы;
- наземное лазерное сканирование;
- Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС).

Исследователи [23, 29, 33, 51] отмечают, что для измерений деформаций инженерных сооружений могут быть использованы оптические и цифровые нивелиры, теодолиты, электронные тахеометры, ГНСС, лазерные сканеры, датчики углов наклона и др.

Наиболее распространенным методом наблюдений за вертикалами смещениями (осадками) сооружений является высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами. Для измерений применяются высокоточные нивелиры с уровнем или с компенсатором, стандартные штриховые инварные рейки длиной 3,0 и 1,75 м или специальные малогабаритные рейки [57].

Сейчас уже разработаны и внедряются в производство методы и приборы, позволяющие измерять непосредственно величину нестворности промежуточной точки от общего или частного створа посредством параллельного смещения линии визирования с помощью оптического микрометра с плоскопараллельной пластинкой, которую помещают в зрительную трубу прибора [51]. Современные технологии створных измерений определяют величины нестворностей в пределах от 5 до 300 мм [51].

Приборы вертикального проектирования более эффективно передают плановые координаты выше и ниже исходной точки, контролируют вертикальность сооружений и используются для наблюдения за деформациями. Самые распространённые из них – оптические центриры, которые, как указывает Б. Н. Жуков [11], по точности делятся на технические, точные и высокоточные. Технические центриры обычно встраиваются в теодолиты, тахеометры и др. Их относительная погрешность 1: 5000 – 1: 10000 при расстоянии от 10 до 20 м.

Метод прямой угловой засечки двумя теодолитами используется в том случае, если горизонтальные и вертикальные углы в каждой точке сооружения измеряются с целью вычисления пространственных координат этих точек. Точность рассчитанных параметров зависит, в основном, от точности используемых теодолитов [47, 51].

Однако детальный анализ существующего метода, с нашей точки зрения, обнаруживает следующие недостатки:

- расстояние между двумя станциями и разница в  $\Delta Z$  измеряется рулеткой и нивелирной рейкой, что приводит к некоторым ошибкам;
- в этом методе отсутствуют геометрические условия, которые касаются всех этих наблюдений и параметров в одном уравнении;
- кроме использования оптических геодезических приборов (нивелиров, теодолитов и др.), часто необходимы также линейки, отвесы, уровни и т. д., и данные измерения обычно выполняются вручную.

Гидродинамическое нивелирование решает проблемы гидростатического нивелирования.

Во-первых, этот метод расширяет диапазон измерений по высоте до 300 м.

Во-вторых, процесс получения информации при наличии большого количества измеряемых точек во многом упрощается.

К настоящему времени разработаны теоретические основы гидростатического и гидродинамического нивелирования, изготовлены и внедряются в произ-

водство переносные гидронивелиры и стационарные системы, изучены основные источники ошибок.

Цифровые нивелиры являются современными многофункциональными геодезическими приборами, совмещающими функции высокоточного оптического нивелира, электронного запоминающего устройства и встроенного программного обеспечения с целью обработки полученных измерений. Использование цифровых нивелиров позволяет исключить личные ошибки исполнителя и ускорить процесс измерения [51]. Цифровые технологии значительно расширяют возможности нивелиров и область их применения.

Электронные тахеометры, которые оснащены сервоприводом, выполняют автоматические измерения. Они могут самостоятельно наводиться на специальный активный отражатель и производить измерения. При наличии специальной системы радиоуправления съемку может производить только один человек, если он находится непосредственно на измеряемой точке. Такая схема съемки ведёт к увеличению производительности проведения съемочных работ примерно на 80 % [75].

Роботизированный тахеометр выполнит измерение деформаций сооружений намного экономичнее, чем при использовании двух теодолитов [51]. Контролируемые точки могут быть оснащены недорогой закрепленной призмой, поэтому многие точки можно наблюдать с одного места. Кроме того, последовательность и сроки проведения измерений можно запрограммировать на автоматические действия [87].

Хотя тахеометр имеет много преимуществ в области мониторинга деформации сооружений (большие расстояния наблюдений, быстрое, удобное и точное измерение углов и расстояний), однако на точность результатов во многом влияют атмосферные условия.

С нашей точки зрения, преимуществами использования электронного тахеометра можно назвать следующие:

- тахеометр может выполнять множество математических операций, поэтому время анализа результатов измерений сокращается;

- тахеометр выполняет атмосферную и инструментальную корректировку с помощью внутреннего программного обеспечения, что делает наблюдения более точными;

- электронный тахеометр имеет карту памяти для хранения данных до 5000 точек. Результаты измерений, полученных тахеометром, могут быть загружены в конкретное считывающее устройство в компьютере.

Однако можно назвать и недостатки использования тахеометра:

- меньшая, чем в нивелировании, точность определения деформаций и осадков;

- коэффициент корреляции между наклонным расстоянием и горизонтальными и вертикальными углами вычислить невозможно.

Новейшей системой измерений для мониторинга деформаций инженерных сооружений является лазерное сканирование, посредством которого можно осуществлять мониторинг сложных зданий и сооружений, фиксировать состояния мест аварий и катастроф и при этом получать реальную картину случившегося [69, 64].

Лазерное сканирование является системой передачи реальной поверхности в цифровой вид [36]. Результатом сканирования является массив точек с известными трехмерными координатами объекта [44, 61].

Работа наземных сканеров основана на принципе измерения расстояний при помощи лазерного излучения, при этом трехмерные модели самых разных объектов получают бесконтактным методом [24]. Высокая производительность и оперативность процесса лазерного сканирования даёт возможность решать задачи по предупреждению различного рода аварий.

Преимущество использования лазерного сканирования в том, что оно обеспечивает плотное трехмерное изображение поверхности объекта, но точность лазерных сканеров не воспринимается адекватно при применении в промышленной

метрологии, например, в мониторинге деформации [51]. Лазерным сканерам требуется дополнительная разработка и совершенствование технологий и методик выполнения измерений.

ГНСС. Становление и развитие спутниковых технологий началось в начале восьмидесятых годов и постепенно стало альтернативой классическим методам геодезии по точности, эффективности и надежности. Уже в 1983-1984 годах спутниковая технология начинает применяться при строительстве в мониторинге сооружений [2, 99]. На сегодняшний день спутниковые технологии осуществляют контроль за сложными и труднодоступными объектами. Это обусловлено возрастающей потребностью обеспечения безопасности при эксплуатации зданий, мостов, железных дорог, строительстве сооружений. Спутниковая технология все чаще применяется как дополнение к существующим системам контроля и мониторинга [2].

Большое преимущество ГНСС-мониторинга – его непрерывный характер, который допускает позиционирование в реальном времени, а также детальные признаки долгосрочной работы. Это особенно важно, когда альтернативой является ручная съемка, выполняемая интервалом в год, полгода или ежемесячно. При непрерывных ГНСС-наблюдениях данные можно получать в любое время [100].

В зависимости от целей и требуемой точности мониторинга деформации в некоторых проектах используют несколько приемников на наблюдаемом сооружении совместно с несколькими базовыми станциями. Установленные на наблюдаемом сооружении, они существенно повышают надежность получаемых результатов; установка двух и более базовых станций за пределами сооружения и последующее вычисление базовых линий гарантирует, что движение свободно от смещения базовых станций [72]. Высокие частоты наилучшим образом позволяют определять динамические деформации линейных сооружений, таких, как высотные здания или длинные фермовые мосты, в то время как низкие частоты больше подходят для медленно или импульсно деформирующихся объектов, таких, как плотины или оползни [76].

### 1.3 Вантовые мосты как пример инженерно-технических объектов

В наши дни все большие города мира имеют мосты, и проекты их с каждым днем становятся всё более оригинальными, зачастую поражают воображение людей, их наблюдающих. Самые знаменитые мосты сегодня – это корейский мост Йонг–Джон, японский Жемчужный мост или вантовый мост Акаши-Кайкио, а также Грeатбелт Линк в Дании [73].

В ходе эксплуатации крупных инженерных сооружений неизменно встаёт вопрос об обеспечении их безопасности, и требования в данном отношении становятся с каждым годом всё более жёсткими. Это касается, безусловно, и вантовых мостов, количество которых в мире на сегодняшний день перевалило за 1100. Среди них около шестидесяти те, длина пролета которых более 300 м.

Основное различие вантовых и висячих мостов в том, что дорожное полотно первых из них более подвижно, и тем самым они могут использоваться для переправ через железные дороги.

Если углубиться в историю сооружения вантовых мостов, то следует упомянуть о первом подобном железнодорожном мосте, который был возведен в 1979 году в Белграде [77]. Вантовый виадук Мийо во Франции известен тем, что у него самые высокие в мире пилоны (343 м), а максимальная длина пролётов не больше 342 м; вместе с тем длина виадука составляет 2460 м, что является максимальной длиной для вантовых мостов [77].

Строительство вантовых мостов началось в 1950-е годы, и на сегодняшний день в мире построено более 2,5 миллиона таких мостов [74]. В 1956 году в Швеции был сооружён мост Стромсунд, который сегодня считается первым современным вантовым мостом. Если говорить о первом подобного типа мосте в Советском Союзе, то здесь можно назвать вантовый мост в Грузинской ССР через реку Магану, который построили в 1932 году [70]. В ряду первых крупных вантовых мостов в СССР – сооружения через реку Нарын, Рыбальский мост через гавань Днепра в Киеве (1963) и другой также через Днепр в столице Украины 1976 года,

в Риге 1981 года. Нельзя обойти вниманием и другие российские вантовые мосты, возведённые в последние годы: это мост в Сургуте (2000) г. Санкт-Петербурге (2004 г.), Москве (2007 г.) и Новосибирске (2014) (новосибирский мост представлен на рисунке 1).



Рисунок 1 – Новосибирский мост, получивший название Бугринский

Последний из названных мостов – Бугринский мост в Новосибирске – считается комбинированным. Его конструкция представляет собой балку, которая установлена на 30 опорах из бетона. Мост весит 27 тыс. тонн, его протяжённость 2097 м, арочный пролёт длиной 380 м, самая высокая точка моста вместе с аркой, если считать от уровня реки, 85 м. На мосту 6 полос для движения транспорта шириной 34,5 м, а проходы для пешеходов составляют 1,5 м. Мост способен пропустить в час 4800 машин. Пролет для речных судов имеет подвесную конструкцию с монолитной аркой из сетки (расчётный пролёт 362 м). Монтаж сводов арки составляет 88 блоков, которые весят в общей сложности 3172 тонны.

Всего на Бугринском мосту насчитывается 156 вант (рисунок 2). Арка подвешена над водой на высоте 80 метров с помощью канатов длиной 9 км [79].

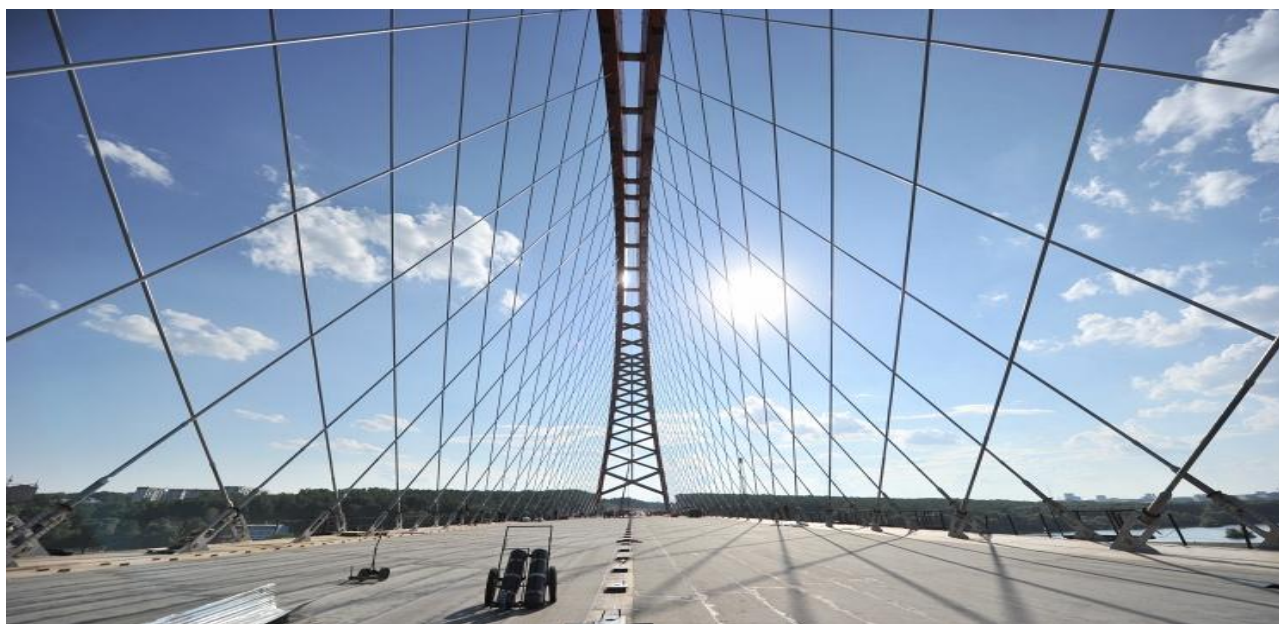


Рисунок 2 – Ванты Бугринского моста в Новосибирске

Можно добавить также, что в Новосибирске планируют в ближайшие годы построить еще один вантовый мост (один из вариантов этого моста представлен на рисунке 3). Этот мост должен соединить центральную часть города с одним из самых оживленных районов левого берега. Считается, что он сможет значительно разгрузить существующие переправы. По внешнему виду будущий мост будет отличаться от арочного Бугринского: он будет поддерживаться опорами и пилоном с вантами на правом берегу. Чтобы на набережной реки сохранить парк, который могли бы испортить опоры, предложено длинные пролеты над парком и Южной площадью города удерживать вантами, которые будут крепиться к пилону [78].



Рисунок 3 – Проект следующего вантового моста в Новосибирске

Есть вантовые мосты и в Египте. На Суэцком канале в городе Qantara Африку и Евразию соединяет кабельный мост, который находится примерно в 50 км к югу от Средиземного моря.

Строительство моста было завершено осенью 2001 года. Мост имеет общую длину около 3900 м с двумя полосами движения для каждого направления транспортных потоков. Основной мост – стальной вантовый мост с длиной балки 730 м, центральным пролетом 404 м и двумя боковыми пролетами по 163 м и с расстоянием 70 м по вертикали от полотна дороги до уровня моря, чтобы обеспечить навигацию на канале.

Пилоны этого моста Н-образной формы из бетонной арматуры высотой около 160 метров. Башня в поперечном сечении выглядит как коробка размерами 7,6 x 7,8 x 0,7 м на базовом уровне, сужающаяся постепенно со средним уклоном 1:35 до 2,5 x 4,5 x 0,5 м на верхнем уровне. В общей сложности 128 кабелей двух пилонов располагаются по 16 вант в прямоугольной плоскости с каждой стороны, и для каждой плоскости были использованы четыре типа кабелей, где пер-

вые два кабеля в башне в поперечном сечении составляют  $27,51 \text{ см}^2$ , ближайшие три кабеля  $42,51 \text{ см}^2$ , другие ближайшие два кабеля  $54,79 \text{ см}^2$  и последние девять кабелей  $67,06 \text{ см}^2$ , как показано на рисунке 4. Основная балка является однородной стальной балкой коробчатого сечения  $20,8 \text{ м}$  ширины с 4 полосами движения, размером  $0,8 \text{ м}$  для тротуаров и  $1,2 \text{ м}$  для средней полосы,  $1,2 \text{ м}$  по краям и  $2,6 \text{ м}$  в середине. Для пилонов и опор используется железобетон, который имеет кубическую прочность на сжатие  $500 \text{ кг/см}^2$ , стальная арматура марки 36/52 с модулем юнга упругости  $2100 \text{ т/см}^2$ , ванта с пределом прочности  $18000 \text{ кг/см}^2$ , с модулем упругости Юнга  $2000 \text{ т/см}^2$  [80].

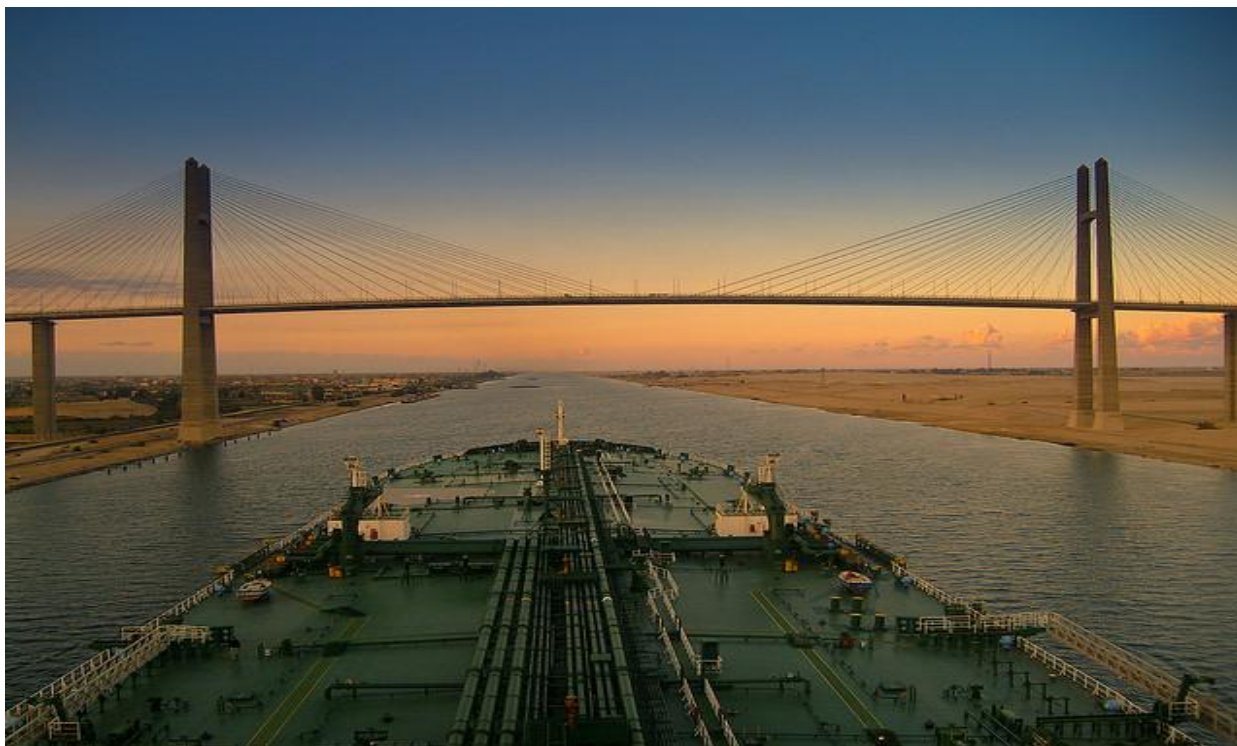


Рисунок 4 – Схема вантового моста на Суэцком канале

Особенность эксплуатации современных вантовых мостов в том, что, поскольку они обладают большой длиной, то и нагрузка на дорожное полотно оказывается чрезвычайно большой, несравнимой с той, какая была на мостах в прошлом. Поэтому резко растут требования по обеспечению безопасных условий использования объектов данного типа. Из внешних факторов, которые наиболее существенно влияют на деформации вантовых мостов, следует назвать ветер (изме-

нение его силы и направления), осадки (их количество), движение волн, толчки при землетрясениях и нагрузка от движущегося транспорта, а также изменение внешних условий [77].

Проблемы при строительстве и эксплуатации мостов могут возникать всегда и везде, даже в наиболее развитых странах. Так, по данным исследователей, почти 15 % мостов в Америке имеют в конструкциях те или иные отклонения от стандартов, а 10 % европейских мостовых конструкций не соответствуют проекту, поскольку в них отмечены определенные дефекты. В мире насчитывается почти 250 000 построенных мостов, которые требуют обследования и ремонта, а состояние их конструкций необходимо подвергать периодическому и систематическому контролю [70].

Ввиду этого сегодня чрезвычайно актуально разрабатывать регулярно действующие системы, которые могут собирать координатные данные об элементах сооружения, подвергаемых контролю, а также систематизировать эти данные, сохранять, проводить их анализ с целью изменения и распространения сведений о тех или иных деталях строящихся и возведенных мостов [70]. Причем такого рода наблюдения необходимо проводить в полном объеме как во время строительства, так и при эксплуатации сооружения [70].

Таким образом, информационные системы, поставляющие оперативные данные о состоянии объектов, о возможности производить их модуляцию и составлять определенный прогноз тех или иных изменений в конструкциях, сегодня имеют большое значение [70]. Создаются новые алгоритмы обработки данных, разрабатываются современные программные продукты, которые способны на порядок ускорить процесс автоматизации при сборе, передаче и изменении информации. Это относится и к данным мониторинга, поскольку современные программные продукты сокращают трудоемкость и ускоряют процесс использования полученной информации. Современные сенсорные и коммуникационные системы могут использоваться практически на любых объектах. При этом они способны без участия человека осуществлять свою деятельность, которая включает-

ся в регулярном отслеживании изменений параметров сооружений, а также в пополнении и обновлении разных баз данных, полученных посредством информационных систем [70].

В состав вантового моста входят, как правило, один пилон или несколько. Эти пилоны посредством прямолинейных стальных тросов (вант) присоединяются к дорожному полотну. Если сравнить висячие и вантовые мосты, то у первых дорожное полотно поддерживается с помощью вертикальных тросов, которые присоединяются к основным несущим тросом, натянутым по всей длине моста, а у вторых тросы присоединены прямо к пилону (рисунок 5) [77].

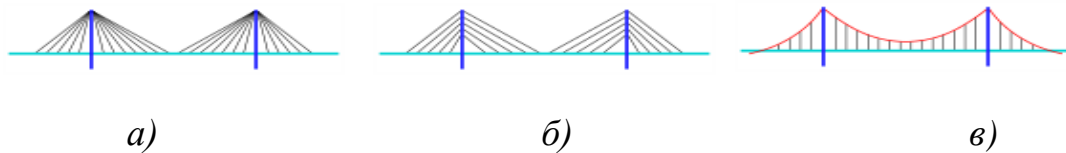


Рисунок 5 – Различия между типами висячих мостов:

а) классический дизайн; б) дизайн в стиле арфы; в) висячий мост.

Можно выделить две основные схемы вантовых мостов:

- мосты, у которых ванты представляют собой решетчатые фермы;
- мосты с балкой жёсткости, которые, в свою очередь, имеют следующие основные элементы: пилоны; ванты; балка жёсткости; мостовые опоры [70].

Чтобы рассчитать параметры висячего моста, нужно произвести вычисления определенных вспомогательных характеристик [22]:  $L$ ,  $\omega_0$  и  $\omega$ . Величина  $L$  - это общая длина кабеля моста между точками, где он закреплен в анкерах, и она рассчитывается по рисунку 6 и формуле:

$$L = l \sqrt{1 + \frac{16f^2}{3l^2}} + 2l_{om} \sec \beta,$$

$$\sec \beta = \frac{\sqrt{h_0^2 + l_{0m}^2}}{l_{0m}}.$$

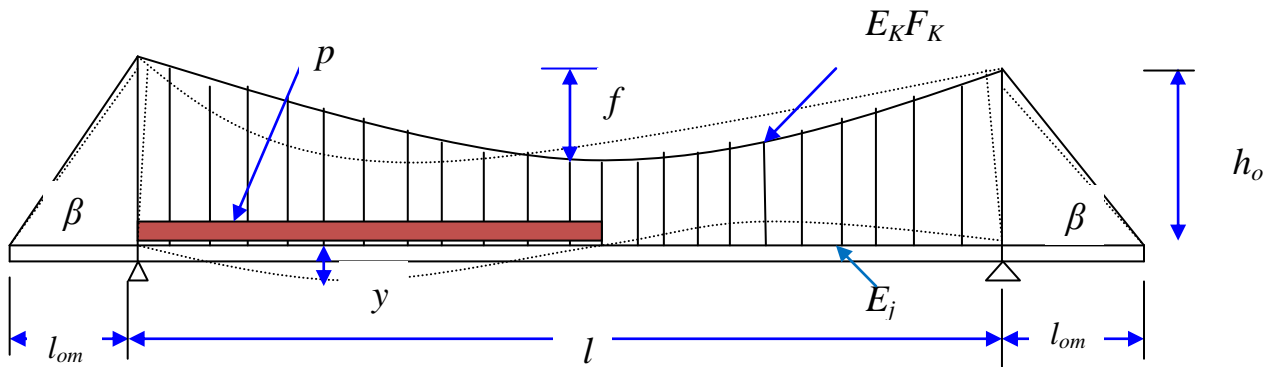


Рисунок 6 – Расчетная схема висячего моста

Характеристики  $\omega_0$  и  $\omega$  находятся в зависимости от геометрических размеров моста, характеристики поперечного сечения кабеля  $E_K F_K$ , жесткости балки  $EI$  и высчитываются по формулам:

$$\omega_0 = \frac{E_K F_K l^2 l}{EI} \frac{64 f^2}{l^2},$$

$$\omega = \frac{\omega_0}{r_0^2}.$$

Деформации и усилия в каждом элементе висячего моста рассчитываются, как правило, при определенных нагрузках пролета, к которым относятся:

$$r_0 = l \sqrt{\frac{H_{OP} + H_g}{EI}},$$

$$H_g = \frac{g l^2}{8 f}.$$

Если загрузить половину пролета моста (от опоры до середины) некоторой равномерно распределенной временной нагрузкой, то распор кабеля от временной нагрузки будет равен

$$H_{op} = P\alpha_0 l,$$

$$\alpha_0 = \frac{8,333 \cdot 10^{-3}}{1/\omega_0 + 8,333 \cdot 10^{-3}}.$$

Изгибающий момент в середине пролета балки жесткости невар:

$$M_0 = Pl^2(1 - \alpha_0)125 \cdot 10^{-3}.$$

Прогиб в середине пролета рассчитывается по формуле:

$$y_0 = \frac{Pl^4}{EI}(1 - \alpha_0)13,021 \cdot 10^{-3}.$$

При загрузении всего пролета временной нагрузкой до половины пролета

$$H_{op} = 0.5P\alpha_0 l.$$

Изгибающий момент в четверти пролета будет равен:

$$M_0 = Pl^2(6,25 - 0,5\alpha_0 9,275) \cdot 10^{-3}.$$

Прогиб в четверти пролета под нагрузкой рассчитывается так:

$$y_0 = \frac{Pl^4}{EI}(5,046 - 0,5\alpha_0 9,275) \cdot 10^{-3}.$$

#### 1.4 Примеры проведения мониторинга инженерных сооружений с использованием ГНСС-технологий

В работе [60] представлены результаты испытания разных мостов – короткого Wilford-моста в Ноттингеме и длинного Хамбер-моста в Халле. Основной за-

дачей при мониторинге ГНСС L1 являлось определение отрезка времени от начала наблюдения сессии и до завершения цикла. Эта задача решалась по-разному для двух разных мостов.

На Уилфорд-мосту было трудно определить что-либо, кроме сильнейшего движения по мосту, однако ГНСС могли определить основные частоты моста даже при очень сильном шуме ГНСС.

Выполненные наблюдения за Хамбер-мостом с использованием ГНСС выявили большие смещения порядка от 20 до 25 см. Результаты SKI-Pro и Kinpos хорошо сравнивать друг с другом, показывая аналогичное движение по мосту. Комплекс наблюдений по Хамбер-мосту связан с движением по нему. Задача упрощалась, когда грузовики двигались только в одном направлении, но становилась более сложной, когда машины двигались в обоих направлениях. Было показано, что с односторонних приемников можно контролировать движение и по короткому, и по длинному мостам одновременно. ГНСС значительно повышали точность и надежность измерений при мониторинге в одной частоте.

А. В Moustafa, Н. Е Adel [90] утверждают, что улучшенные результаты ГНСС, по сравнению с результатами точного нивелирования, могут быть использованы для мониторинга деформации моста во время статистического тестирования. В мониторинге деформаций посредством ГНСС испытывали нагрузки мостов, и это дало субмиллиметровую точность.

В качестве жизнеспособного инструмента мониторинга деформации мостов ГНСС испытывались в Египте и снова показали более точные результаты, чем при использовании других методов измерения; отмечено, что уровни шума могут быть уменьшены с помощью расширительных средств или с помощью фильтра нижних частот [90].

В работе О. Akyilmaz, R. N.Çelik и др. [46] описаны контрольные испытания с помощью техники ГНСС подвесного моста, соединяющего континенты Азии и Европы, а именно, Фатих Султан Мехмет-моста. В дополнение к ГНСС-наблюдениям, были получены некоторые другие данные, относящиеся к влиянию

таких факторов, как объем трафика и погодных условий для соответствующего времени наблюдения. На первом этапе был составлен временной ряд соответствующих точек компонент перемещений (деформаций), который был связан с такими данными, как время, объем трафика и погодных условий. Было установлено, что искусственные нейронные сети являются эффективными инструментами для моделирования сложного поведения деформирующихся объектов относительно причинных факторов, особенно в случае непрерывных систем мониторинга.

В работе Н. М Abozeid, М. N Fayed и др. [45] представлена технология определения структурных свойств вантовых мостов с использованием измерений в динамике. Инструментом анализа явились выходные данные. В ходе эксперимента проводился модальный анализ с целью извлечения модальных свойств измеряемой структуры. В качестве примера для выполнения динамических измерений предлагалась обновленная модель вантового моста Суэцкого канала. В работе особое внимание было уделено испытательной установке.

В работе К. Wong, К. Man и др. [100] описана также ГНСС-технология, которая была использована для определения состояния вантового моста. В Гонконге сооружен мост, по которому осуществляются автомобильные и железнодорожные перевозки. После того, как точность ГНСС измерений в реальном времени достигла сантиметрового уровня, он стал вполне пригодным для мониторинга трехмерных смещений моста в ответ на ветровые, температурные и транспортные нагрузки.

Система мониторинга состояния моста постоянно отслеживает положение моста по трем параметрам: несущая способность, эксплуатационная надежность и долговечность эксплуатации. Несущая способность взаимосвязана со структурной устойчивостью и текущим состоянием материалов. Оценка несущей способности осуществляется на основе количественного анализа текущих параметров несущей способности, для того чтобы избежать катастрофических последствий. Эксплуатационная надежность связана с деформациями, наличием трещин и вибрациями моста вследствие действия обычных нагрузок. Долговечность эксплуата-

ции устанавливается по данным текущих мостовых дефектов, вызванных повреждениями, и их влиянием на физические свойства материалов. Совместно эти три аспекта предлагают ценную информацию для решения задач планирования и составления графиков технических осмотров и технического обслуживания. Создание такой системы является достаточно дорогостоящим мероприятием, однако стоимость такой системы несравнимо меньше затрат на устранение последствий катастроф, кроме того, человеческих жертв.

В сентябре 2002 года в Чикаго (США) был проведен мониторинг высотного здания [77]. В работе [77] приведена схема изображения приближающегося потока ветра, сталкивающегося с наветренной стороной высотного здания и разделяющегося на два завихрения, воздействующих, в свою очередь, на другие стороны здания. За этим следует смещение здания по направлению ветра, а также колебания из стороны в сторону (перпендикулярно ветру). Данные смещения могут быть одновременно зафиксированы с помощью ГНСС-систем. После выполнения стандартных измерений двумя высокоточными двухчастотными ГНСС-приемниками были измерены фоновые и резонансные компоненты смещения в направлениях по ветру и перпендикулярно ему. С помощью этого комплекса получено уникальное представление о фоновом компоненте структурной реакции настоящего здания для сравнения его с расчетами в аэродинамической трубе. Результаты показали, что точность ГНСС-данных постоянно меняется в течение дня из-за местоположения и доступности спутников.

Системы контроля деформации опорного контура и мембранной крыши крытого конькобежного стадиона с размерами 200 x 100 x 15 м даёт представление об основных принципах построения и точных характеристиках современной автоматизированной системы контроля деформации большепролетных купольных конструкций. Автоматизированная система состоит из рабочих станций, деформационных марок, опорных точек и пульта оператора. Рабочие станции в виде моторизованных электронных тахеометров установлены на постоянные геодезические знаки. Геознаки и опорные точки закрепляются в стабильных конструкци-

ях. Относительно опорных марок определяются смещения деформационных марок, расположенных на опорном контуре и мембране крыши.

Следовательно, если проанализировать современное состояние данного вопроса, то можно выявить погрешности наблюдений за деформациями и принцип их обоснования посредством некоторых методов измерений (таблица 2) [51].

Таблица 2 – Допустимые погрешности наблюдений за деформациями и принцип их обоснования

Данные, полученные при помощи геодезических методов определения деформаций	Допустимые погрешности измерения перемещений, мм		Вид инженерных сооружений, подвергнутых наблюдению
	Вертикальные перемещения	Горизонтальные перемещения	
Высокоточное геометрическое нивелирование	$\pm (0,05 - 0,20)$	–	Первый класс
Координаты трех точек, полученных посредством теодолита	$\pm (0,3 - 1,0)$	$\pm (0,2 - 1,0)$	Первый и второй класс
Данные, полученные с помощью тахеометра	$\pm (0,3 - 1,0)$	$\pm (0,2 - 1,0)$	Первый и второй класс
Данные наземного лазерного сканирования (НЛС)	$\pm (3,0 - 5,0)$	$\pm (3,0 - 5,0)$	Третий класс
Данные ГНСС наблюдений	$\pm (5,0 - 7,0)$	$\pm (3,0 - 5,0)$	Третий класс
Створные измерения	–	$\pm (0,05 - 2,0)$	Первый класс

## 2 ПРИМЕНЕНИЕ ГНСС ДЛЯ МОНИТОРИНГА

### 2.1 Метод ГНСС-позиционирования

Навигационные системы ГЛОНАСС и GPS были предназначены для координатно-временного обеспечения театров военных действий. Единственным методом позиционирования было абсолютное позиционирование по точному или общедоступному коду (автономный метод по ГОСТ Р 53606-2009). Позднее был разработан дифференциальный метод ДГЛОНАСС и DGPS. По этому методу мобильный приёмник использует дифференциальные правки, полученные на базовой станции. Так появились подсистемы функционального дополнения ГНСС. К ним относят подсистемы наземного (GBAS) и космического (SBAS) базирования, такие, как WASS, EGONS, MSAS. Они позволяли достигать субметровую точность по кодовым измерениям.

Широкое использование фазовых наблюдений началось в 80-е годы XX века. Вначале был разработан относительный метод, потом – дифференциальный, а в 90-е годы – абсолютное позиционирование по фазе несущей. В относительном методе, как и в дифференциальном, работает базовая станция (приёмник с известными координатами) и определяемый приёмник. Наблюдения производятся строго синхронно и требуют достаточно продолжительного времени. В результате обработки получается вектор базовой линии. Высокая точность субсантиметрового уровня достигается за счёт исключения коррелированных погрешностей при образовании одинарных, двойных и тройных разностей, а также комбинаций фаз [3].

Абсолютное позиционирование по фазе несущей (метод *precise point positioning*, PPP) хотя и позволяет добиваться высокой точности, но, во-первых, оно требует длительных сеансов наблюдений, а во-вторых, для обработки нужны точные эфемериды спутников, что для мониторинга в реальном времени недопустимо из-за их большой задержки (около двух недель). Характеристики точности

дифференциального и относительного методов определения координат представлены в таблице 3.

Наконец, существует еще кинематический фазовый метод RTK, позволяющий моментально, с высокой точностью и в реальном времени определять координаты [3].

Таблица 3 – Характеристики точности дифференциального и относительного методов определения координат [52]

Метод измерений	Вид аппаратуры	Длина, км	Продолжительность сеанса	Тип эфемерид	Программ. обеспечение	Погрешность
Дифференц. GPS	Кодовая	до 500	Несколько минут	Бортовые	Коммерческое	(1 – 5) м
WADGPS	Кодовая	по земн. шару	Несколько минут	То же	То же	1 м
Фазовый, статика	Фазовая одночастот.	до 50	15 мин – 1ч	»	»	$(2 + 10^{-5}D)$ мм
Кинематика	Фазовая одночастот.	до 5	Несколько секунд	»	»	$(2 + 5 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Кинематика, с иниц. OTF	Фазовая одночастот.	до 5	До несколько минут	»	»	$(2 + 4 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Кинематика, с иниц. OTF	Фазовая, двухчастот.	до 10	До несколько минут	»	»	$(2 + 3 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Network RTK	Фазовая, двухчастот.	–	–	»	Специальное	(5 – 10) мм
Быстрая статика	Фазовая, одночастот.	до 7	Несколько минут на точку	»	То же	$(2 + 2 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Быстрая статика	Фазовая, двухчастот.	до 20	Несколько минут на точку	»	»	$(2 + 2 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Статика	Фазовая, одночастот.	до 15	45 мин на точку	»	»	$(2 + 2 \cdot 10^{-6}D)$ мм
Статика	Двухчастотная	15 – 100 15 – 100	от 1 до 4 ч	Бортовые Точные	» »	$(2 + 2 \cdot 10^{-6}D)$ мм $(2 + 2 \cdot 10^{-7}D)$ мм
Статика	Фазовая, двухчастот.	до 2000	От несколько часов до несколько суток	Точные	Специальн. коммерч., научное	до $10^{-8}D$ , мм

## 2.2 Требования к системе мониторинга мостов

*Сценарии мониторинга.* Мониторинг в геодезии с успехом используется для определения напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, состояния зданий и сооружений, которое вызывается факторами природного и техногенного характера, с целью снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, а также контроля их устойчивости.

Поскольку внешние факторы воздействуют постоянно, то это с течением времени приводит к износу сооружения, а если нагрузки чрезмерно велики, износ будет носить ускоренный характер, что может обернуться необратимыми деформациями и разрушением конструктивных элементов. Чтобы заранее предупреждать о возможности изменений геометрических параметров мостового сооружения и постоянно контролировать и прогнозировать его состояние, необходимо с определенной периодичностью проводить обследование конструктивных элементов моста и выполнять комплекс геодезических измерений его параметров [40].

Однако в момент возникновения критической ситуации трудно получить оперативные данные, при этом информации для расчета текущих динамических характеристик сооружения недостаточно, чтобы можно было сравнить их с проектными значениями. Поэтому на сегодняшний день актуальной считается задача разработать постоянно действующие системы, которые могли бы собирать, анализировать, преобразовывать, хранить, систематизировать, отображать и распространять пространственно-координированные данные об элементах сооружения, контролируемых в период эксплуатации сооружения. Необходимо также помнить, что мониторинг мостов, пилоны которых по высоте достигают сотни метров, следует проводить уже на этапе строительства [40].

Периодический и постоянный мониторинг таких сооружений, как мосты, нужно проводить в ходе всего периода строительства. Но на этапе завершения строительства наибольшую роль начинает играть непрерывный мониторинг. Однако нельзя забывать, что наблюдения за состоянием сооружения требуется осу-

ществлять в полном объеме как в ходе строительства, так и во время его эксплуатации [70].

Цель мониторинга деформаций мостов состоит в контроле геометрических параметров на предмет соответствия их проекту и обеспечении безопасного строительства и эксплуатации данных мостов [70].

Обычно периодический мониторинг состояния сооружения проводится с применением самых разных геодезических средств: при определении вертикальных осадок используются оптические высокоточные нивелиры; для определения горизонтальных и вертикальных смещений необходимы электронные тахеометры; если нужно определить горизонтальные и вертикальные смещения, можно воспользоваться спутниковыми приемниками; горизонтальные смещения могут быть определены также и дальномерами; в ходе геодезических измерений часто используются акселерометры, датчики наклона, щелемеры, тензометры и другие средства сбора данных [40].

В зависимости от вида сооружения и его состояния, обследования проводятся обычно через год или тогда, когда приходит запрос эксплуатирующей организации. После завершения цикла измерений необходим некоторый период времени, чтобы перевести данные в цифровой вид и их обработать. После проведения такой обработки геодезических измерений в результате будет получена информация о текущем состоянии объекта, которая будет содержать значения смещений, деформации конструкций и отклонений каких-либо величин от тех, которые рассчитывались на этапе проекта или строительства.

Для развития всех отраслей экономики сегодня все большую роль начинают играть информационные системы, которые могут дать оперативные данные о состоянии объектов, смоделировать или спрогнозировать тот или иной процесс.

Сегодня средства измерений таковы, что данные можно получать непосредственно в цифровом виде, а с помощью современных средств коммуникаций эти данные могут быть переданы на вычислительные системы, чтобы подвергнуться обработке в режиме реального времени [40].

При использовании новейших программных продуктов и алгоритмов обработки информации процесс сбора, передачи и анализа данных настолько автоматизирован, что позволяет в значительной степени сократить его трудоемкость и повысить оперативность. То же самое можно сказать и о данных мониторинга инженерных сооружений, который перестает быть периодическим и превращается в действительно оперативный мониторинг.

Систему, состоящую из современных сенсоров и коммуникаций, сегодня можно установить практически на любом сооружении. Причем для ее работы участие человека необязательно, изменения параметров деформации отслеживаются непрерывно, так же как пополняются и обновляются базы данных информационных систем. Можно с уверенностью констатировать, что новейшие автоматизированные системы мониторинга деформаций необходимы, их внедрение и использование происходит как в России, так и в других странах мира [69].

Как утверждают специалисты, мониторинг мостов необходимо проводить комплексно, и эта работа должна осуществляться с начала строительства сооружения. Первый этап данного процесса – создание в районе строительства современной геодезической инфраструктуры, которая должна включать в себя разбивочную основу и спутниковые базовые станции, проводящие транслирование дифференциальных RTK-поправок [69].

Со спутниковыми базовыми станциями необходимо связывать также приямостовое планово-высотное опорное обоснование. Между данными станциями и пунктами государственной геодезической сети должно осуществляться взаимодействие по принципу «от общего к частному»; параметры трансформации координат должны вычисляться в различных системах координат. Спутниковые средства измерений следует использовать и в момент выноса проекта в натуру, и при геодезическом контроле, так как на мосту, высота пилонов которого более 100 метров, традиционные оптические инструменты применить зачастую невозможно из-за метеоусловий. При этом единые данные спутниковых базовых станций могут использоваться и при проведении обычных геодезических разбивочных ра-

бот, а при возведении конструкций может быть применена автоматизированная система геодезического обеспечения [69].

*Частота собственных колебаний моста.* Колебания – это прямолинейные возвратные движения. Собственными колебаниями конструкции называют колебания, которые появляются из-за какого-либо начального воздействия в момент, когда непрерывно действующие силы отсутствуют. Колебания называются вынужденными, если их возникновение вызвано непрерывным действием возмущающей силы (к ним относятся, например, порывы ветра). При этом на величину собственных колебаний влияют только характеристики самой конструкции (размеры перекрываемых пролётов, геометрия поперечного сечения, используемые материалы и т. д.). Если собственные и вынужденные колебания окажутся равны или частота их будет кратной, для конструкции может возникнуть самое опасное явление – явление резонанса, т.е. резкое возрастание амплитуды колебаний, что может стать причиной разрушения данной конструкции. Поэтому при проектировании строительных конструкций в обязательном порядке должны проводиться их испытания и расчёт на уменьшение колебаний [37].

Движение транспортных средств по мостам должно быть плавным, и для этого упругие прогибы пролетных строений следует ограничивать от подвижной временной вертикальной нагрузки, а для продольного профиля пути или проезжей части указывать необходимые очертания.

Если на мосту отсутствует подвижная временная вертикальная нагрузка, то до возникновения длительных деформаций алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля может быть выше значений, указанных в таблице 4, не более чем в два раза.

Если для висячих пролетных и вантовых строений используются витые канаты, то при задании очертания профиля проезда и строительного подъема следует учитывать, что канаты могут подвергнуться такому виду деформации, как ползучесть представленной в СНиП 2.05.03-84 [37].

Таблица 4 – Алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля

Расчетные скорости на участках дороги, прилегающих к мосту, при движении одиночных легковых автомобилей, км/ч	Алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля, ‰
150 – 100	8
80	9
70	11
60	13
40	17

Если пролетные строения относятся к внешне статически неопределимым системам, то при расчетах необходимо учитывать, что верх опор и их осадки могут перемещаться.

Стальные балочные мосты с пролетами более 100 м и вантовые и висячие мосты должны проверяться на пространственную жесткость и аэродинамическую устойчивость. Если конструкции обладают динамическими характеристиками, которые сильно отличаются от соответствующих характеристик построенных мостов, то, кроме аналитических расчетов, подобного типа исследования необходимо проводить на моделях [37].

Висячие, вантовые и стальные балочные мосты должны подвергаться также проверке на резонанс колебаний в направлении, перпендикулярном потоку ветра. При проверке аэродинамической устойчивости необходимо определение критической скорости ветра, поскольку при ее достижении из-за взаимодействия с сооружением воздушного потока может возникнуть явление флаттера (опасных изгибно-крутильных колебаний балки жесткости). Определенная в ходе расчетов или найденная по результатам аэродинамических испытаний моделей критическая скорость, указывающая на появление флаттера, должна быть не менее чем в 1,5 раза больше максимальной скорости ветра, возможного в месте расположения моста.

Расчетная схема конструкции должна соответствовать геометрической схеме ее проекта, при этом деформации под нагрузкой и строительный подъем можно не учитывать (за исключением пилонов вантово-балочных мостов) [37].

При проведении расчетов висячих и вантовых мостов, у которых гибкие несущие элементы изготовлены из витых канатов с металлическим сердечником, необходимо учитывать их ползучесть, продольную и поперечную.

Продольные деформации вант пролетных строений вантовых систем определяются с учетом приведенного модуля упругости, вычисляемого по формуле

$$E_{ef} = \frac{E}{1 + \frac{E\rho^2 g^2 l^2 A^3}{24} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1^2 S_2^2}},$$

где  $E$  – модуль упругости каната;

$\rho$  – плотность материала каната;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$l$  – горизонтальная проекция ванты;

$A$  – площадь поперечного сечения каната;

$S_1, S_2$  – соответственно начальное и конечное значения усилия в ванте – до и после приложения нагрузки, на которую выполняется расчет.

На основе расчетов деформации пилоны висячих и вантовых мостов следует подвергать проверке на устойчивость и прочность. При проверке общей устойчивости пилон должен испытываться на гибкость, и при этом необходимо учитывать переменную жесткость, условия его закрепления и нагружения на фундаментах и в узлах примыкания вант, кабелей и ригелей. Для пилонов вантово-балочных мостов необходим учет следящего эффекта от усилий в вантах.

Чтобы повысить аэродинамическую устойчивость пролетных конструкций вантовых и висячих мостов, нужно увеличивать их крутильную жесткость, поставив продольные и поперечные связи по отдельным главным балкам или применив балки жесткости замкнутого коробчатого сечения и придав ей обтекаемую

форму. В зависимости от длины пролета и структуры его конструкций происходит реальная частота колебаний моста от 1 до 5 с.

### 2.3 Выбор метода ГНСС

Инструменты, применяемые при мониторинге, вследствие тяжелых условий, которые встречаются в прогибе моста, должны быть простыми по установке, легкими и надежными. Интерпретация результатов мониторинга должна быть несложной. Данные результаты играют большую роль в экстремальных ситуациях чрезмерных нагрузок, таких, как ураганный ветер, землетрясение, извержение вулкана. Однако при этом, чтобы правильно интерпретировать динамику мониторинга мостов, необходимо привести измерения в соответствие с требованиями спецификации точности, т.е. прогибы моста нужно измерять с помощью доступных геодезических инструментов.

Если контролировать смещения инженерных сооружений на уровне миллиметровой и выше точности, то здесь достаточно использовать традиционные методы. Новейшие ГНСС-методы могут предоставить двухмиллиметровую точность [29].

Для мониторинга структурной деформации применяются обычно геодезические тахеометры, теодолиты, геодезические роботы, EDM, фотограмметрические и другие геодезические инструменты. Однако эти наземные геодезические системы имеют ряд недостатков, которые сильно ограничивают сферу их применения. Можно назвать следующие основные недостатки этих геодезических систем:

- а) долгосрочные интервалы между измерениями долгосрочны (от нескольких дней до нескольких месяцев);
- б) усреднение данных в течение достаточно длительного временного промежутка;
- в) низкий уровень автоматизации и относительно низкие частоты дискретизации;

г) пакетный режимный анализ (сбор данных, передача их на компьютер и оценка производится через несколько часов).

Вследствие указанных выше недостатков наземные методы обследования не могут применяться одновременно для контроля строений, обладающих как динамической структурой деформации, так и деформационной структурой полустатических движений.

Зато ГНСС для мониторинга структурной деформации имеет несомненные преимущества (рисунок 7). Назовем основные [63]:

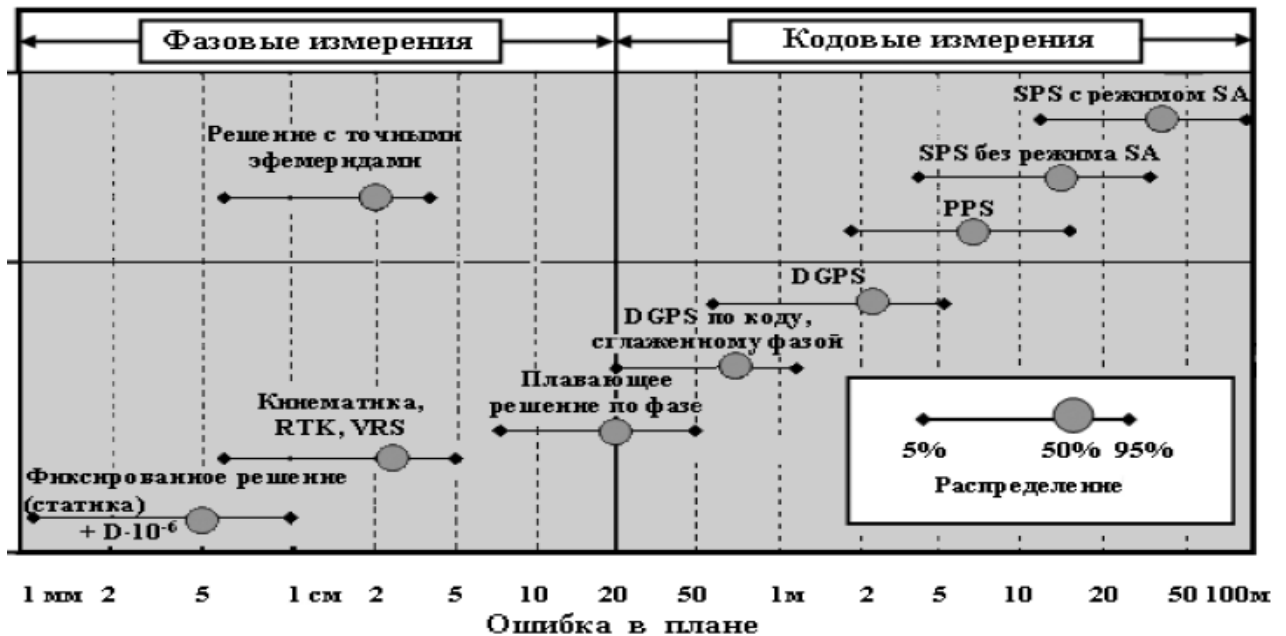


Рисунок 7 – Точность методов ГНСС-измерений [3]

- любые метеоусловия наблюдения;
- непрерывный мониторинг со скоростью передачи данных до 20 Гц;
- разные уровни точности с целью удовлетворения различных потребностей (ГНСС может осуществлять измерения с точностью позиционирования от 1 см (мгновенные) до 1 мм (с усреднением));
- 3D позиции с равномерно определенной мировой ссылкой (WGS84);
- кинематические методы эффективного сбора данных;

– автоматизированные операции почти в реальном времени, при этом участие человека минимально;

## 2.4 Кинематика реального времени (RTK)

Сеть RTK обеспечивает сантиметровую точность в реальном времени. Это фазовая методика позиционирования, обеспечивающая работу при расстоянии между приемниками до десятков километров (расстояние между подвижным приемником и ближайшей станцией сети) с производительностью, сопоставимой с одиночной RTK-системой (действующей на более коротких базовых линиях) [30, 91]. Базовые станции должны быть расположены с плотностью, достаточной для моделирования ошибок, зависящих от расстояний, с достаточной точностью, чтобы остаточные ошибки двойных разностей фазовых наблюдений могли не учитываться в случае быстрого разрешения неоднозначности [98, 97, 89].

После двойных разностных неясностей, связанных с приемниками базовой станции, могут быть определены до корректного значения остаточные значения двойных разностей GPS/ГЛОНАСС. Пространственно коррелированные ошибки для интерполяции могут быть остаточными ошибками псевдодальностей и фазовых измерений для частот L1 и/или L2 или линейных комбинаций [16, 54]. Существует два подхода к данным коммуникационных систем: связь между главной базовой станцией (MCS, где все вычисления выполнены) и различными базовыми станциями; связь между MCS и пользователями [49].

Кроме того, с точки зрения реализации сети RTK, есть три возможных построения:

- создание виртуальной базовой станции (VRS) и поправок;
  - генерирование и передача поправок по сети;
  - передача сырых данных для всех базовых станций [92].
- Рассуждения о лучшем подходе продолжаются по настоящее время, и возможно, что комбинации из нескольких из них могут быть применены с соответствующими сообщениями RTCM/RTK [98].

Разработана альтернативная стратегия сетевой обработки фазовых и кодовых одночастотных ГНСС-наблюдений для определения местоположения с сантиметровой точностью в режиме постобработки в условиях разреженных сетей станций ГНСС [86]. В процессе обработки формируются и используются зональные ионосферные и тропосферные коррекции на основе наблюдений не только референсных станций, но и наблюдений самих потребителей. Эта новая сетевая технология одночастотного позиционирования имеет следующие характеристики: при одночастотном сетевом позиционировании в статическом режиме съемки в зоне покрытия сетей с межбазовыми расстояниями до  $\sim 200$  км на удалениях потребителя от ближайшей станции сети до  $\sim 100$  км величины погрешностей (RMS) позиционирования составляют менее 1 см в плане и  $\sim 2$  см по высоте; при одночастотном сетевом позиционировании в кинематическом режиме съемки в зоне покрытия сетей с межбазовыми расстояниями до  $\sim 200$  км на удалениях потребителя от ближайшей станции сети до  $\sim 100$  км величины погрешностей (RMS) позиционирования составляют  $\sim 4$  см в плане и  $\sim 6$  см по вертикали [85]. В зоне покрытия сетей с межбазовыми расстояниями до  $\sim 100$  км на удалениях потребителя от ближайшей станции сети до  $\sim 50$  км величины погрешностей (RMS) позиционирования составляют  $\sim 2$  см в плане и  $\sim 4$  см по вертикали [98].

Алгоритм MRS разделяется на два подхода, а именно: основанный на поправках и с непосредственной связью. Первый подход использует наблюдения, полученные на базовой станции для оценки ошибок пространственной корреляции сети и интерполяции этих поправок до положения подвижного приемника. Числовой алгоритм поправок был разработан с использованием определенного значения интерполяции к приемнику. Они включают алгоритм линейной интерполяции [56], алгоритм частной производной [101] и алгоритм численного решения по МНК [95, 55]. Сравнивая относительную производительность этих методов, можно сделать вывод, что они приблизительно одинаковы. Эти алгоритмы рассмотрены здесь подробно, особенно метод численного решения по МНК и алгоритм частной производной (последний представлен в работе [48]).

В настоящее время отсутствуют готовые приемники, способные принимать поправки сети RTK; поэтому поправки обычно генерируются на главных базовых станциях. Эти исправленные наблюдения затем используются для обработки одиночной базовой линии от главной базовой станции к подвижному приемнику с использованием существующего ПО для обработки одиночных базовых линий. К сожалению, программные пакеты обычно придают значимость полученным от базовых станций поправкам, основанным на расстоянии между антеннами. Для того чтобы избежать этого, создается виртуальная базовая станция (VRS) на близком расстоянии от приемника так, чтобы приемник не придавал значимость исправленным наблюдениям [56]. Для того чтобы генерировать измерения VRS, измерения главных базовых станций передаются в положение VRS. Эти переданные измерения затем корректируются путем интерполяции сети поправок от трех окружающих точек регулярной сети. Этот шаг создания VRS может быть исключен, если будет разработан стандарт передачи поправок с возможностью взаимодействия сетей.

Существующий сервис морской радиотехнической комиссии (RTCM) версии 2.3 – это известная последовательность сообщений, позволяющая передавать сырые наблюдения базовых станций (сообщения 18, 19) или поправки базовых станций (сообщения 20, 21) пользователям в реальном времени применения DGPS. Однако этот стандарт позволяет только передавать информацию от одной базовой станции к одиночной базовой станции методом RTK. Недавно представленная последняя версия RTCM поддерживает сеть позиционирования RTK, в то время как всеотраслевой стандарт передачи только ожидается [56].

Предложенные сообщения используют версию 2.3 RTCM, основанную на принципе основной-вспомогательный, который использует два типа сообщений. Первый – стандарт данных одиночной базовой станции сети. Эта станция считается главной станцией. Второй тип сообщений содержит разности поправок других базовых станций сети по отношению к главной станции. Эти разности попра-

вок позволяют пользователям напрямую интерполировать пространственные поправки [56].

## 2.5 Аппаратура и программное обеспечение

Проблеме выбора аппаратуры для различных видов работ посвящен ряд публикаций [67 и др]. Правильный выбор приемника и сопутствующей аппаратуры позволяет добиваться необходимой точности и высокой производительности при минимальных материальных затратах или предохраняет от неожиданных неприятностей. Нужно иметь также в виду, что многие приемники имеют набор опций, за каждую из которых необходимо доплачивать. Можно выстроить следующую примерную шкалу спутниковых приемников в зависимости от их возможностей и стоимости: фазовый одночастотный приемник (статика обязательна, быстрая статика, кинематика истинная и кинематика «стой – иди» – по необходимости); фазовый одночастотный приемник с теми же возможностями и с возможностями работы в реальном времени; фазовые двухчастотные приемники, по аналогии с одночастотными приемниками с возможностями статики, быстрой статики, истинной кинематикой, кинематикой «стой – иди», с возможностями измерений в реальном времени или только с пост-обработкой [3].

Назовем некоторые из значимых параметров спутниковой аппаратуры: тип принимаемых сигналов, способ измерения фазы; число каналов в приемнике; чувствительность приемника; односистемные и двухсистемные приемники; типичный темп записи данных; ослабление влияния многопутности путем обработки сигнала; подавление интерференции; тип антенны и ее характеристики; внешние сигналы; наличие автоматической метеостанции; объем внутренней памяти; модели; точность; физические характеристики и цена [3].

В алгоритмах для инициализации ОТГ применяют метод функций неоднозначности, или исследование неоднозначностей по методу наименьших квадратов (МНК), с фильтром быстрого исследования неоднозначности, а также метод уравнивания неоднозначностей с исключением корреляций по МНК [67].

Наилучшие результаты в RTK получаются, когда опорная и подвижная станции наблюдают одни и те же восемь или более спутников при  $PDOP \leq 2$ . Хорошие результаты можно получить, если пара приемников наблюдает пять общих спутников при  $PDOP \leq 4$ .

Используемые для обработки программы принято делить на коммерческое программное обеспечение, поставляемое производителями спутниковой аппаратуры, и многоцелевое научное программное обеспечение, которое поставляется от разработчиков из научных организаций. Программы первой группы предназначены преимущественно для обработки данных от приемников определенного типа.

Программные продукты, как правило, включают главную программу, управляющую модулями, которые выполняют следующие процессы: планирование сеансов наблюдений или доступности спутников; работу с проектами; пересылку данных; редактирование данных; обработку базовых линий; обзор сети; преобразование координат; уравнивание геодезической сети; вывод результатов обработки.

Метеосенсоры расположены в районе мониторинга для измерения в реальном времени тока, атмосферных параметров, температуры, влажности и давления (STS DTM – W & T – STS метеосенсоры).

## 2.6 Ошибки в результатах ГНСС-измерений

*Ошибки в эфемеридах спутника.* Для оценки влияния ошибок измерений на качество данных ГНСС и, в конечном счете, на достигаемую точность позиционирования и надежность следует принимать во внимание уровень шума измерений. Под двумя основными измерениями расстояний посредством ГНСС подразумевается следующее [65]:

а) шум псевдодальности:

– «длина волны» C/A кода составляет приблизительно 300 м; 3 м – решающая способность по дальности или шум измерений (однако су-

ществует тенденция к использованию аппаратуры с субметровым разрешением С/А кода);

– «длина волны» Р кода составляет около 30 м; 0,3 м - разрешающая способность по дальности или шум измерений;

б) шум несущей фазы:

– длина волны несущей частоты L1 составляет 0,19 м, подразумеваемая миллиметровое разрешение или шум измерения несущей;

– длина волны несущей частоты L2 составляет 0,24 м, подразумеваемая миллиметровое разрешение или шум измерения несущей.

Различные способы применения ГНСС требуют разных уровней точности ГНСС. Отсюда различное разделение систематических ошибок и случайных и немоделируемых ошибок [83]. В одном случае позиционирования, основанного на псевдодальностях, все воздействия за исключением «неопределенности» часов спутника и приемника относятся к ошибкам [10]. Другая крайность – определение базовой линии ГНСС с относительной ошибкой 10 – 8 для некоторых задач прикладной геодезии требует, чтобы все ошибки измерений были максимально учтены. В случае координатных определений с помощью ГНСС можно принять следующую классификацию [65]:

а) систематические ошибки;

– зависящие от спутника: ошибки в эфемеридах спутника и ошибки в часах спутника;

– связанные с приемником: ошибки в часах приемника и неоднозначности координат базовой станции;

– связанные с наблюдениями: ионосферная задержка, тропосферная задержка и неоднозначность несущей фазы;

б) случайные и немоделируемые ошибки:

– пропуск цикла несущей фазы;

– многолучевость;

– смещение фазового центра антенны [96].

Следует отметить, что в навигационном сообщении содержатся координаты положения спутника и функции времени, спрогнозированные на основе предыдущих наблюдений, произведенных наземными станциями управления. Обычно наземная система управления, исходя из четырех часовых промежуточных данных, дает прогноз новых положений спутника, которые в течение следующего одного часа он будет занимать. Модель действующих на спутники сил нельзя назвать совершенной, и поэтому в оценках положения спутников неизбежны ошибки, которые называются ошибками эфемерид. Ошибка эфемерид дает неточность от 2 до 5 м [2, 59, 67].

У спутников ГЛОНАСС и GPS бортовые эфемериды, передаваемые в навигационных сообщениях, определяют местоположения с ограниченной точностью, поскольку эта информация является прогнозом движения спутника и хода бортовых часов. Чтобы достичь наивысшей точности в определении местоположения, необходимо знать точные эфемериды спутников ГНСС [71, 83, 67].

Ошибка эфемерид будет идентичной для всех пользователей GPS, которые отслеживают спутник. Но поскольку разные пользователи наблюдают один и тот же спутник с разных углов, то, соответственно, ошибки влияют на измерения дальности и, как следствие, на вычисление положения по-разному [59, 67].

Чтобы решить эту проблему, несколько учреждений (Geomatics Canada, NGS и IGS) разработали службу, целью которой является получение более точных значений. В основе этих значений находятся данные, собранные в сети IGS. Точность определения орбиты варьируется от дециметра до нескольких дециметров. Точные эфемериды становятся доступными приблизительно через две недели [71].

Ошибка  $M$  в координатах начала сети вызывает ошибку  $M_D$  в базовой линии длиной  $D$ , которая определяется с помощью формулы:

$$M_D/D = k \cdot M/R,$$

где  $R$  – радиус Земли;

$k$  – коэффициент у разных авторов принимает значения от 0,3 до 1.

Кроме того, от этих ошибок зависит повышение общего уровня ошибок в сети, возникновение систематических ошибок и ухудшение разрешения неоднозначностей фазы, особенно при одночастотных измерениях [Антонович и др., 2000].

В момент измерения вычисление координат спутника производят по элементам орбиты. Их можно получить или по навигационному сообщению (бортовые эфемериды), или взять из службы точных эфемерид, или определить в ходе уравнивания сети. В последнем случае необходимо использование специальных научных программ. Ошибка  $M_E$  положения спутника на орбите с высотой  $H$  над земной поверхностью станет в базовой линии причиной ошибки, величину которой можно рассчитать по формуле:

$$M_D/D = k_E \cdot M_E/R.$$

В разных источниках для коэффициента  $k_E$  приводят значения 0,1 – 1. Кроме того, от ошибок эфемерид зависит увеличение времени, которое необходимо для разрешения неоднозначности фазы. Это играет особенно большую роль для кинематического режима наблюдений в реальном времени. Данный недостаток в значительной степени компенсируется методом сетевой RTK, поскольку цель его – уточнить эфемериды и атмосферные задержки [3].

*Ошибки в часах спутника.* Ошибка часов спутника ГНСС, отклонение и ее величина определяются одинаково. Случайные отклонения цезиевого или рубидиевого стандарта частоты непредсказуемы, такие модели определения ошибок часов спутника имеют точность около 20 нс или 6 метров в эквиваленте расстояния, в зависимости от времени последнего обновления навигационного сообщения [30].

*Ошибки в часах приемника.* ГНСС-приемники оборудованы кварцевыми часами, преимущество которых в компактности, малом энергопотреблении и относительно низкой стоимости. В дополнение они имеют хорошую стабильность час-

тоты на коротком промежутке времени. Однако некоторые приемники оборудованы внутренними и внешними портами для связи с внешними стандартами частоты, такими, как цезиевый, рубидиевый или даже водородный для специальных приложений [31].

*Ошибки на базовых станциях.* Дифференциальный метод ГНСС требует, чтобы координаты одной из станций, на которой расположен приемник, были неизменными в течение всего периода обработки. Эта станция является базовой. На самом деле оценивается только относительное положение или компоненты базовых линий от второго приемника до базовой станции. Любая ошибка в координатах этой базовой станции вызывает ошибку в решении [65].

*Ионосферная задержка.* Ионосфера – это слой атмосферы, простирающийся от 50 до 1000 км над поверхностью земли. В этом слое солнечная ультрафиолетовая радиация ионизирует молекулы газа, которые затем теряют электрон. Эти свободные электроны в ионосфере влияют на распространение микроволновых сигналов (скорость, направление и поляризацию), поскольку они проходят через слой. Наибольшее влияние оказывается на скорость сигнала и, следовательно, на измеряемую дальность ионосферы [31].

Отражательный индекс микроволн ( $n$ ) – функция частоты, а следовательно, ионосфера имеет свойство «рассеивания» и плотности свободных электронов и может быть выражена аппроксимацией первой степени [107]. Это иллюстрируется следующим выражением:

$$n = 1 \pm \frac{A \cdot N_e}{f^2}, \quad (1)$$

где  $A$  – константа;

$N$  – коэффициент преломления;

$N_e$  – общая плотность электронов (эл/м<sup>3</sup>);

$F$  – частота.

Знак "±" в формуле (1) будет зависеть от того, требуется ли коэффициент преломления дальности (+) или фазы (-). Скорость распространения  $v$  соотносится с коэффициентом преломления:

$$V = \frac{c}{n}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость электромагнитной радиации в вакууме.

Уравнения (1) и (2) подразумевают, что скорость несущей волны («фазовая скорость») в действительности увеличивается («повышается»), поэтому коэффициент преломления фазы меньше, чем общий. Однако скорость дальномерных кодов уменьшается, и поэтому псевдодальность считается «замедленной», в связи с чем коэффициент преломления дальности больше, чем общий. Соответствующее выражение для общей ионосферной задержки ( $d_{ion}$ ) и ионосферной задержки фазы ( $\phi_{ion}$ ) при распространении микроволн от спутника до поверхности Земли следующее: [93].

$$d_{ion} = -\phi_{ion} \cdot \frac{c}{f} \approx 40.28 \cdot \frac{STEC}{f^2} \approx \frac{40.28}{\cos ec \zeta} \cdot \frac{VTEC}{f^2}, \quad (3)$$

где  $d_{ion}$  – общая ионосферная задержка в метрах;

$\phi_{ion}$  – ионосферная задержка фазы в единицах периода;

$c$  – скорость ЭМР в вакууме (м/сек);

$\cos ec \zeta$  – косеканс зенитного угла линии прямой видимости спутника;

$f$  – частота сигнала (Гц);

$STEC$  – общее содержание электронов, выраженное числом свободных электронов на квадратный метр (эл/м<sup>2</sup>);

$VTEC$  – содержание электронов в направлении зенита (эл/м<sup>2</sup>).

Из уравнения (3) видно, что, чем выше частота, тем меньше влияние ионосферной задержки [107]. Как отмечалось ранее, измерения псевдодальности ока-

зываются слишком длинными ( $d_{ion}$  должна быть вычтена), в то время как измерения "фазовой дальности" (фаза выражена в единицах метров) оказывается слишком короткой ( $d_{ion}$  должна быть прибавлена или  $\phi_{ion}$  должна быть вычтена). Следовательно, постоянная  $A$  в уравнении (1) соответствует интегралу:

$$A = 40.28 \int STEC \cdot ds.$$

Существует ряд факторов, которые влияют на величину ТЕС (также STEC или VTEC): широта положения приемника, сезон, время суток, в которые выполняются наблюдения, и уровень солнечной активности во время наблюдений [38].

Воздействие ионосферы подвержено пространственным и временным изменениям. Пространственные изменения, как правило, низкочастотные и обычно соответствуют изменениям ионосферы по широте: тропические, средние широты и полярные. Временные изменения могут быть высокочастотные, среднечастотные и низкочастотные. 11- летний цикл солнечной активности недавно характеризовался минимумом в 1986 и 1995 гг., а максимумом – в 1991 г. [39].

ТЕС максимален в низких широтах, тропических зонах и полюсах и минимален в средних широтах. Ночью ионосферная задержка в 5 – 10 раз меньше, чем во время дневных наблюдений. Когда производятся фазовые измерения только на частоте L1, масштабный эффект будет представлен короткими базовыми линиями, если ионосферная задержка незначительна. Этот эффект выражен как отношение длины базовой линии в миллионных долях (ppm) и представляется следующим образом [93, 42]:

$$\frac{\Delta L}{L} \approx -0.7 \times 10^{-17} VTEC,$$

где  $L$  – длина базовой линии и  $\Delta L$  – ошибка.

Влияние этой масштабной ошибки может изменяться  $0,4 \cdot 10^{-6} - 3,0 \cdot 10^{-6}$  для базовых линий, определенных из одночастотных измерений, соответствующих низкой и высокой солнечной активности соответственно.

*Тропосферная задержка.* Тропосферная задержка вызвана преломлением сигнала в электрически нейтральном (неионизированном) слое атмосферы, который простирается от поверхности Земли на 8 км [81]. Другая составляющая нейтральной атмосферы – стратосфера, которая находится на высоте 50 км от начала ионосферы. Для рассмотрения атмосферной задержки под термином «тропосферная задержка» будем понимать обе компоненты, поскольку тропосфера, хотя и является сравнительно тонкой, содержит большую часть массы нейтральной атмосферы и практически весь водяной пар [68]. Тропосферная задержка – это функция угла возвышения спутника и высоты приемника и зависит от атмосферного давления, температуры и давления водяного пара [102].

$$d_{trop} = \int (n - 1) \cdot ds,$$

или в единицах преломления тропосферы  $N_{trop} = 10^6(n - 1)$ :

$$d_{trop} = 10^{-6} \int N_{trop} \cdot ds.$$

Преломление тропосферы может быть разделено на две компоненты: сухая часть атмосферы и влажная часть:

$$N_{trop} = N_{wet} + N_{dry},$$

и общая тропосферная задержка:

$$d_{trop} = d_{dry} + d_{wet},$$

$d_{trop}$  может быть определена путем отдельного рассмотрения двух составляющих  $d_{dry}$  и  $d_{wet}$ . Около 90 % величины тропосферной задержки возникает из-за сухой компоненты и оставшиеся 10 % – от влажной компоненты. Ряд моделей для определения тропосферной задержки базируется на численном [67].

*Неоднозначность фазы.* Ошибка из-за неоднозначности фазы характеризуется уравнением для постоянных фазовых измерений, как показано на рисунке 8 [102]:

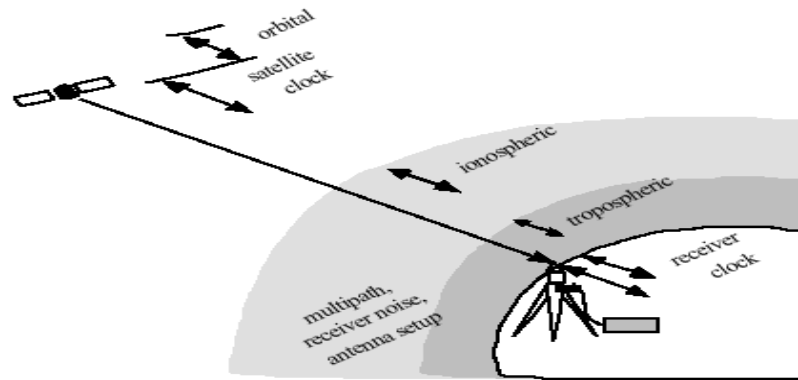


Рисунок 8 – Ошибки и смещения GPS

$$\phi_{bj}^i(T_j) = \phi_{ff}^i(T_j) + C_R(T_j) = (f_0 / c) \cdot \rho_{d^i}(T_j) + \phi_{bias}(T_j) + n_{j^i},$$

где  $\Phi_{bj}^i(T_j)$  – несущая фаза для приемника  $j$ , спутника  $i$ , во время приема  $T_j$ ;

$\Phi_{ff}^i(T_j)$  – измеренная часть фазы (в диапазоне от 0 до 2, от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , от 0 до 1 цикла);

$C_R(T_j)$  – измеренное целое число «переходов через нуль» остаточной фазы в течение наблюдений;

$\rho_{d^i}(T_j)$  – геометрическое расстояние от приемника  $j$  до спутника  $i$  во время приема  $T_j$ ;

$f_0$  – частота сигнала ( $L1$  или  $L2$ ),

$\Phi_{bias}(T_j)$  – содержит все остальные смещения, которые не рассматриваются в данный момент,

$n_j$  – неоднозначность, неизвестное целое число циклов при первом наблюдении (представляет «отсутствующую» постоянную компоненту в связке приемник-спутник).

Существование неопределенности фазы означает, что постоянное позиционирование с использованием фазовых данных одной эпохи невозможно [94]. Включение неопределенности как избыточных параметров усложняет задачу определения координат. Теоретически все неоднозначности фазы должны быть целыми значениями [43].

*Пропуск цикла фазы несущей.* На практике пропуск фазы обычно определяется и исключается на этапе предварительной обработки. Для решения этой задачи разработано много методов, зависящих от таких факторов, как: используемый метод измерений, длина базовой линии, тип данных, динамика антенны и постоянная дополнительная величина, которая влияет на все наблюдения после эпохи  $T_e$  (рисунок 9) [84].

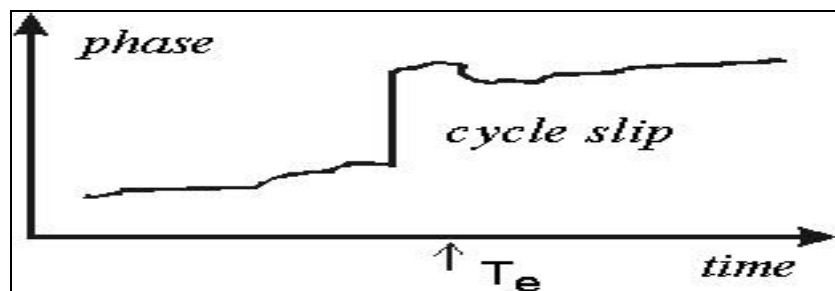


Рисунок 9 – "Скачок" последовательности измерений несущей фазы из-за пропуска фазы

*Многолучевость и интерференция сигнала.* Многолучевость вызвана внешними отражениями от близлежащих металлических объектов, поверхности земли или воды, принимаемых антенной. Существует ряд последствий многолучевости: например, может возникнуть интерференция между прямым и отраженным сигналом, как показано на рисунке 10, приводящая к более зашумленным измерениям: или может произойти сбой электроники аппаратуры, приводящий к ошибочным измерениям, которые являются суммой расстояния спутник-отражатель и отражатель-антенна [59].

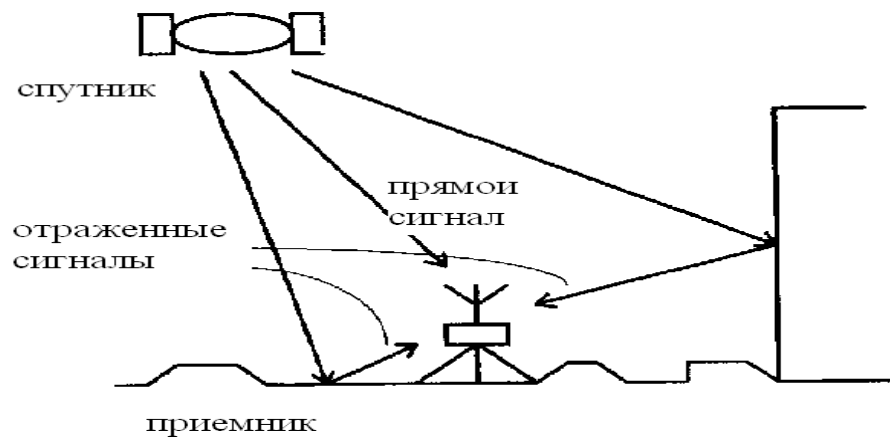


Рисунок 10 – Ошибка многолучевости

Величина влияния многолучевости на фазовые измерения может быть оценена из следующего математического отношения [67],

$$\tan \Delta\phi_m = \frac{\beta \cdot \sin \Delta\phi}{1 + \beta \cdot \cos \Delta\phi},$$

где  $\Delta\Phi_m$  – смещение несущей фазы сигнала, полученного антенной вследствие многолучевости;

$\Delta\Phi$  – сдвиг фазы отраженного сигнала относительно прямого сигнала;

$\beta$  – коэффициент затухания, который изменяется от 0 (отсутствие отражения) до 1 (отраженный сигнал такой же силы, как и прямой).

*Смещение фазового центра антенны.* Все ГНСС-измерения выполняются от электромагнитного центра спутникового излучателя до электромагнитного центра приемной антенны. В идеальном случае физический центр должен совпадать с электромагнитным центром, однако существует постоянное смещение. Это проблема изготовления антенн, но если антенна всегда ориентирована в одном направлении, влияние на решение *наземная точка – наземная точка* будет систематически короче или длиннее базовой линии [53]. Для проведения высокоточных измерений не следует применять различные типы антенн или заменять антенны

между положениями и приемниками во время съемки (таблица 5). Для различных типов антенн модели изменения фазового центра доступны по данным МГС [93].

Таблица 5 – Источники погрешностей и способы их ослабления при построении эталонного пространственного полигона [3]

Источник ошибок	Способ исключения или ослабления
Ошибки эфемерид	Использование точных эфемерид МГС (точность около пять см, обработка по двойным разностям)
Ионосферная задержка	Использование двухчастотной аппаратуры, финальное решение по комбинации фазы несущей, свободной от влияния ионосферы
Тропосферная задержка	Проектирование сети с малой разностью пунктов высот, применение при обработке файлов тропосферной задержки от ближайших пунктов сети МГС
Многолучевость	Использование аппаратуры, устойчивой к многопутности, продолжительные сеансы наблюдений, удаление на время измерений наружных знаков (пирамид)
Нестабильность фазовых центров антенн	Использование приемников с однотипными антеннами
Геометрия спутников	Выбор сеансов с величинами PDOP меньше четыре и числом спутников больше шести, использование всей возможной качественной геометрии созвездия
Ошибки центрирования и измерения высоты антенны	Принудительное центрирование, специальные переходники с целью измерений высоты антенны штангенциркулем
Геометрия сети	Избыточные связи между пунктами
Шумы измерений и смещения	Измерение с помощью двух комплектов аппаратуры, несколькими сеансами продолжительностью более 4 ч

Чтобы уменьшить влияние некоторых из названных выше ошибок, используется методика RTK-измерений и/или линейные комбинации между наблюдениями. Кроме того, могут быть применены модели ошибок ГНСС [34].

## 2.7 Выводы

В данном разделе проанализированы источники ошибок, возникающих при определении координат по технологиям ГНСС, и методы устранения или минимизации ошибок. Выполнен обзор наиболее часто встречающихся моделей пространства тропосферной и ионосферной задержек.

Выделены три основных направления минимизации или устранения ошибок определения координат: использование дифференциального метода, выбор адекватных моделей тропосферной и ионосферной задержек и их линейная комбинация. В дальнейших разделах именно этим направлениям было уделено наибольшее внимание с примерами анализа их реализации для конкретных объектов и с некоторыми авторскими выводами и рекомендациями. Главным результатом является возможность прогноза. В данном аспекте описанные выше геодезические методы, использующие RTK, могут предоставить ценные данные оценки состояния деформационных конструктивных элементов.

### 3 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ГНСС-СЕТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ СЕТЕЙ ЕГИПТА, КУВЕЙТА И МЕККИ)

#### 3.1 Сеть Египта

*Наблюдения сети Египта.* Безопасность мостов является проблемой, которая заинтересовала многих исследователей в прошлом и все еще актуальна. С этой точки зрения используется комплексная система мониторинга для наблюдения и оценки структурных деформаций мостов с применением геодезических методов и передовых точных систем геодезии (ГНСС) [13, 14]. Ученые по-прежнему ждут большее разнообразие точных и мгновенных оперативно получаемых данных для проверки и калибровки своих аналитических моделей при проектировании и анализе мостов [26].

Важно отметить, что у пользователей существуют технологические проблемы использования ГНСС в аспекте фиксирования относительных смещений и их дальнейшего математического анализа. Таким образом, актуальным является уточнение развитие математического обоснования, которое бы в реальном времени обеспечивало обработку кинематических данных RTK-GPS для структурного мониторинга и обеспечивало прогнозирование деформаций во времени [14].

При использовании какой-либо модели или метода наблюдения и анализа, инженер обычно делает их оценку (и оптимизацию), исходя из трёх факторов: стоимости затрат, времени и достижения точности. Поэтому в первую очередь необходимо определить различие между моделями, используемыми в ГНСС-технологиях [13]. Один из вариантов структурной схемы изучения влияния факторов на точность ГНСС представлен на рисунке 11.



Рисунок 11– Вариант структурной схемы изучения влияния факторов на точность ГНСС

Главная цель исследований заключается в выполнении оценки методики съемки методом относительности при определении координат. Такое исследование может быть проведено с двух основных позиций:

- определить положение станции М, расположенной на инженерном факультете университета г. Мансура. Положение должно быть определено с максимальной точностью и часто обновляться, чтобы быть использованным в качестве базовой станции в дальнейших исследованиях;
- исследовать преимущества метода PPP при использовании данных от 9 станций МГС в дифференциальном режиме как функцию от следующих факторов:

- а) эфемериды МГС и данные спутниковых часов МГС;
- б) длительность наблюдений (изменяется от 5 мин до 12 ч);
- в) длины базовых линий (варьируются от 500 до 4000 км);
- г) угол отсечки.

Практические исследования были выполнены для оценки ожидаемой точности определения координат точек с помощью двухчастотных приемников на базовой станции и поправок, загруженных из сети Интернет для дифференциальной GPS. Чтобы достичь требуемой точности определения координат точек, первич-

ные данные для станции М были получены с помощью двухчастотного приемника Trimble 4000SSE и данных со станций из сети Интернет; данные были конвертированы в формат RINEX (Receiver Independent Exchange) с использованием системного ПО, и затем была выполнена обработка в относительном режиме. Сеть наблюдений МГС сначала была обработана для определения точности базовой линии с использованием распространяемых эфемерид, как и в большинстве случаев в обычной GPS [104]. Те базовые линии, которые не обеспечивали достаточной точности, были исключены.

В результате обработки были получены координаты точки М для различных комбинаций базовых линий для двух частот (L1 и L2) при длительности наблюдений: 5; 10; 15; 30; 60 мин и 2; 4; 6; 8; 10; 12 ч. Сеть МГС с точкой М была заново обработана с использованием точных эфемерид, определяющих положение спутника в определенное время; точные эфемериды получены по данным МГС [106].

Сеть Египта состояла из базовой станции М (рисунок 12), расположенной на инженерном факультете г. Мансура, и 10 точек удаленных станций, располагавшихся вокруг данной точки. Аппаратурой для наблюдения являлись двухчастотные приемники Trimble 4000SSE с интервалом записи 15 с в течение 12 ч.

В таблице 6 показаны длины базовых линий между точкой М и всеми станциями сети МГС и доступность данных наблюдений на каждой станции. Каждый столбец отображает доступность данных в интервале времени 1 ч.

Все данные, полученные из сети Интернет, имели интервал записи 15 с и угол отсечки  $15^\circ$ . Карта, показывающая название, положение станций МГС и их удаление до точки М, приведена на рисунке 13.

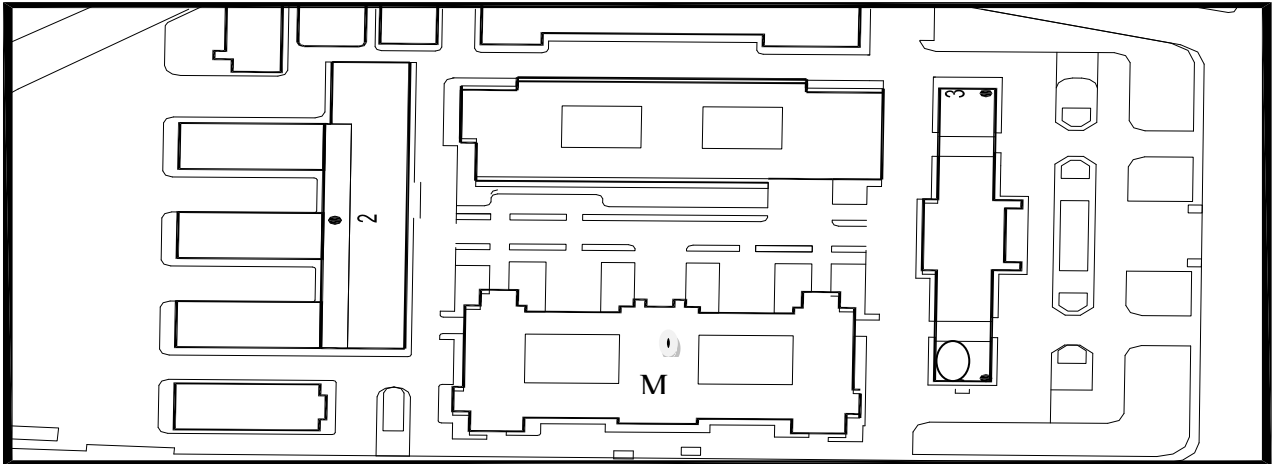


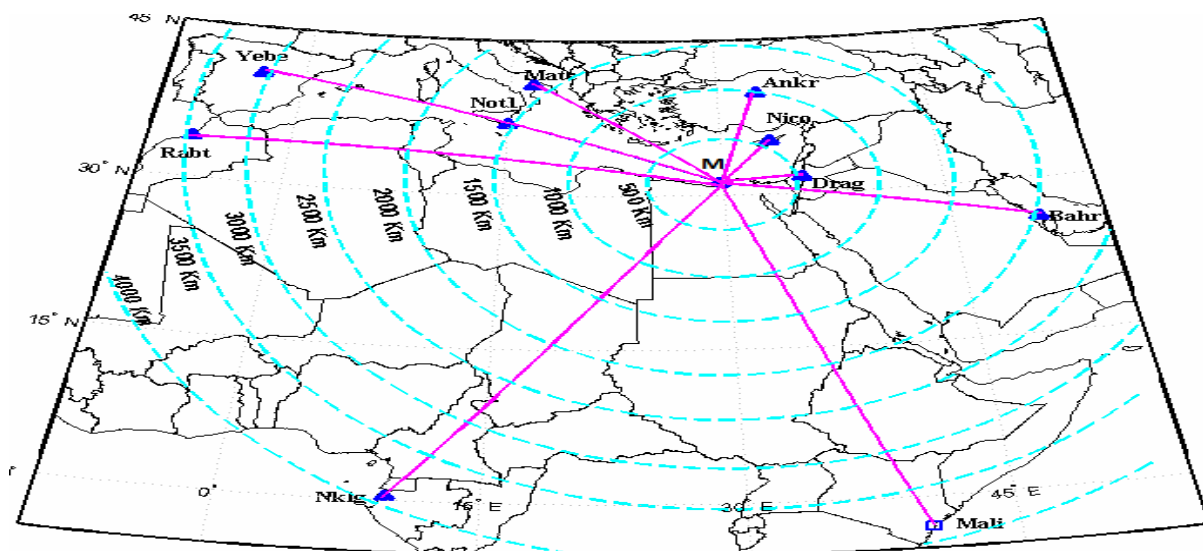
Рисунок 12 – Положение точки М на инженерном факультете

Таблица 6 – Длины и доступность базовых линий, образованных различными пунктами сети МГС и станцией М

Базовая линия		Базовая линия (км)	Время наблюдения в часах (GPSTime)											
от	до		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
М	М	0,000	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Drag		521,480	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
NICO		543,104	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ANKR		995,728	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
NOT1		1509,895	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
MATE		1580,546	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
BAHR		2082,489	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
YEBE		3103,016	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
RABT		3406,251	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
MALI		3875,687	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
NKLG		3960,787	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Данные доступны

□ Данные не доступны



- ▲ Данные доступны      □ Данные доступны, но искажены

Рисунок 13 – Станции МГС, выбранные для проведения исследования

Координаты девяти выбранных станций МГС, опубликованных ARP и используемых в исследовании, приведены в таблице 7; все координаты даны в системе ITRF2005, которые доступны из NGS. Последние лог-файлы станций были использованы для дополнения полного набора данных, необходимых для станций МГС. Эти лог-файлы опубликованы на домашней странице МГС. Таблица 8 показывает наборы данных для этого исследования, соответствующие дате 20.12.2007, когда выполнялись наблюдения [106].

Используемое программное обеспечение.

В исследованиях было использовано два коммерческих программных продукта – Trimble Geomatics Office и GPSPACE.

Trimble Geomatics Office. ПО Trimble Geomatics Office разработано компанией Trimble Navigation Limited. Двойная дифференциальная обработка выполнена с помощью ПО Trimble Geomatics Office.

Таблица 7 – Координаты сетей постоянных станций МГС

Название станции	Местоположение	Координаты станций МГС в системе ITRF 2005, м			Информация о приемнике	
		X	Y	Z	Тип приемника	Тип антенны
Drag	Israel	4432980,748	3149432,017	3322110,358	ASHTECH Z-XII3	ASH7009 36D_M
NICO	Thalassic	4359415,799	2874117,013	3650777,755	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T
ANKR	Turkey	4121948,563	2652187,947	4069023,702	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T
NOT1	Italy	4934546,317	1321264,924	3806456,042	TRIMBLE 4000SSI	TRM296 59.00
MATE	Italy	4641949,648	1393045,328	4133287,388	TRIMBLE 4000SSI	TRM296 59.00
BAHR	Bahrain	3633908,955	4425275,494	2799861,352	ASHTECH Z-XII3	ASH7009 36B_M
YEBE	Spain	4848724,745	-261632,306	4123094,078	TRIMBLE 4000SSE	TRM220 20.00
RABT	Morocco	5255617,716	-631745,773	3546322,471	ROGUE SNR-8000	TRM296 59.00
NKLG	Gabon	6287385,799	1071574,422	39132,804	TRIMBLE 4000SSI	TRM296 59.00

ПО GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemeris) разработано Geodetic Survey Division и является частью линейки продуктов CACS, находящихся в бесплатном доступе [58].

Сбор и обработка данных. Одна станция для каждой базовой линии принималась за опорную точку (то есть точку, координаты которой известны из сети станций «Станция МГС»), а другая – в качестве неизвестной точки (т.е. точки М, координаты которой неизвестны). Для каждой базовой линии выполнены дли-

тельные наблюдения в течение 12 ч 20.12.2007 г., которые соответствовали 355 сут.

Полученные данные были разделены на сессии для каждого из выбранных периодов (5; 10; 15; 30; 60 мин и 2; 4; 6; 8; 10; 12 ч).

Порядок обработки для первого исследования. Первый этап обработки был выполнен для каждого сеанса с использованием передаваемых бортовых эфемерид, которые обеспечивают predetermined положение спутников в любой момент времени. Для каждого сеанса нужно было убедиться, что все решения базовых линий имеют целые или плавающие значения и после этого базовые линии имеют допустимые значения дисперсии. Только на одной станции МГС, MALI, были обнаружены поврежденные данные и не найдено решение. Данные с этой станции были исключены из анализа. После этого оставшиеся базовые линии показали приемлемые решения, и к ним был применен следующий этап обработки [106].

Второй этап обработки включал 9 существующих станций. Каждая базовая линия была обработана индивидуально с использованием данных точных эфемерид. Данные были разделены на 11 сессий: 5; 10; 15; 30; 60 мин и 2; 4; 6; 8; 10; 12 ч для исследования влияния времени наблюдений на точность определения координат. Затем был выполнен сравнительный анализ между результатами первого и второго этапа.

*Короткие и длинные базовые линии.* В соответствии с принятыми исходными критериями, было вычислено средневзвешенное положение точки М, полученное от всех станций МГС с использованием всех 12-часовых данных (таблица 9). Это значение принято как "истинное" положение, которое будет использоваться в качестве эталона для оценки точности во всех последующих исследованиях.

Для проверки надежности этих «истинных» или «стандартных» положений, было вычислено другое значение с помощью опции в используемом программном

обеспечении, а именно «Решение сети». Это решение дает результат с использованием данных всех пунктов сети.

Результирующие значения получились почти идентичными с принятым значением (в пределах 5 мм).

Следует отметить, что в данных формулах Земля принималась за сферу, которая не является точной в расчете позиционирования. Однако все значения, которые были использованы при дальнейшем анализе, являются отклонениями (разница от средневзвешенного значения). Ошибка в результате использования сферы будет впоследствии удалена в процессе вычисления разностей [106].

Таблица 9 – Принятые истинные координаты точки М

Тип координат	Координаты	Стандартные отклонения
Астрономические	$\lambda = 29^{\circ}41'15,312''$ E	0,006
	$\varphi = 32^{\circ}42'18,223''$ N	0,007
	H = 62,185 м	0,027
Геоцентрические	X = 4732481,541 м	0,010
	Y = 2723630,781 м	0,012
	Z = 3285478,213 м	0,028

Данные координаты точки М получены из Египетской геодезической сети (HARN) (рисунки И.1 и И.2 в приложении И).

Целесообразность использования дифференциального решения.

Степень доверия к дифференциальному решению наблюдаемой точки (М) относительно станций МГС очень ясно прослеживается из рисунка 14.

Этот рисунок показывает график измерений положения точки М, полученных из дифференциального решения. Решение А обозначает положение, определенное абсолютным методом наблюдений. Кластер решения В обозначает абсолютные положения приемника, определенные дифференциальным методом по отношению к каждой из станций МГС. Это показывает высокий уровень доверия к дифференциальному решению. Кластер точек В показан в более крупном масштабе на рисунке 15. Решение, полученное от девяти станций МГС и приведенное на рисунке, показывает, насколько близки решения МГС друг к другу.

Очевидно, что решения являются очень близкими друг к другу даже притом, что станции МГС отделяют сотни километров от местной станции. Они разбросаны со стандартным отклонением  $\sigma X = 25$  мм,  $\sigma Y = 15$  мм. Здесь для повышения надежности дифференциального решения между точкой расположения приемника и каждой станцией МГС был установлен высокий уровень доверия [106].

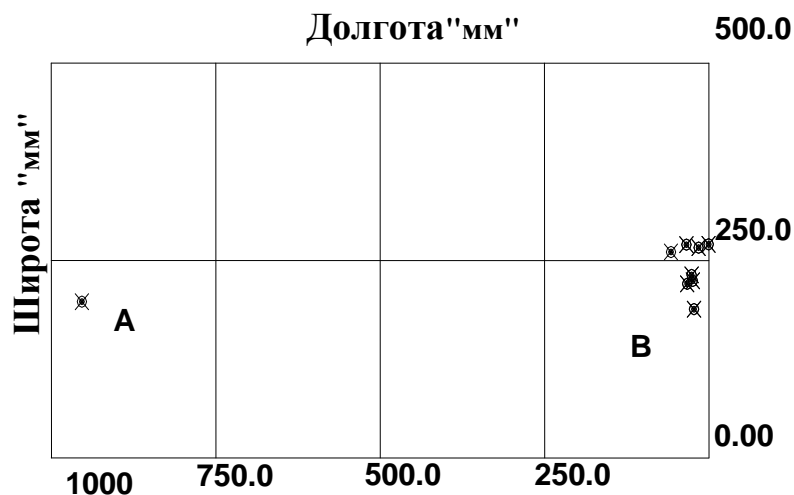


Рисунок 14 – Надежность дифференциальных решений, полученных от станций МГС

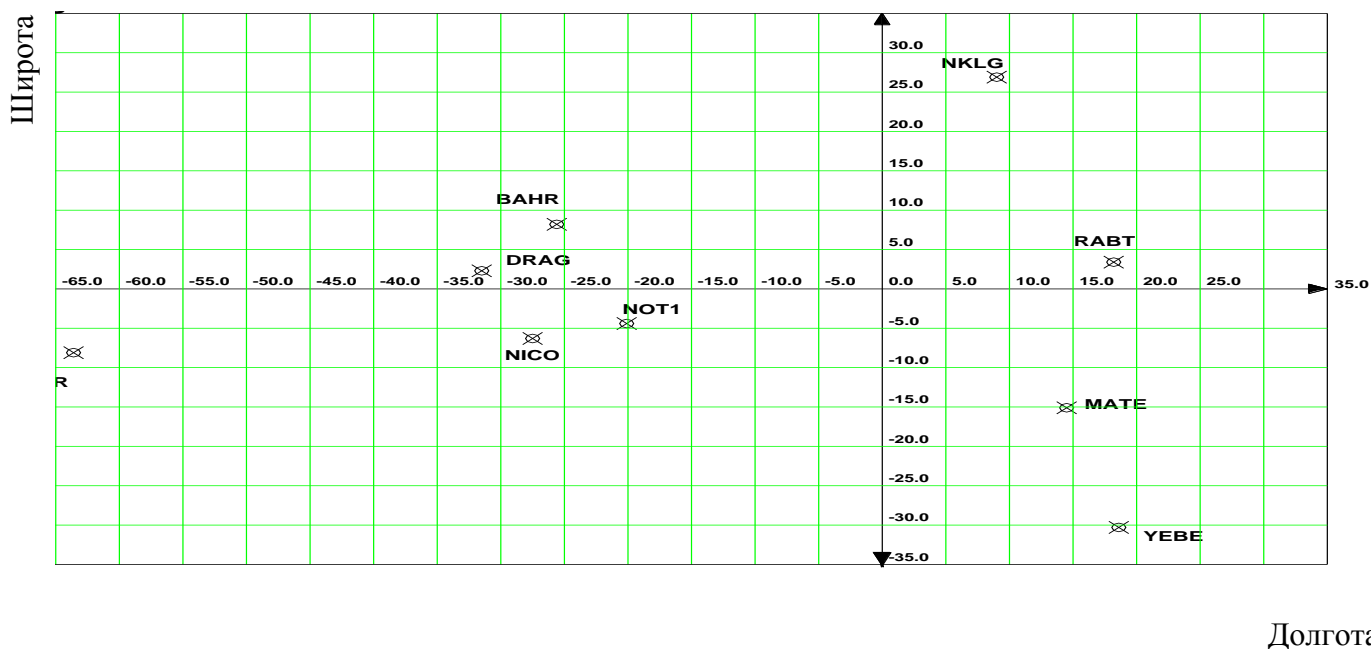


Рисунок 15 – Кластер точек В

Влияние длины базовой линии на измерения показано на рисунке 16. Этот рисунок характеризует стандартное отклонение длины базовой линии при другом

временном интервале; и можно увидеть, что значение стандартного отклонения кажется постоянным при длине базовой линии до 520 км, а затем начинает увеличиваться при длинах исходных линий от 520 до 4000 км. Значение стандартного отклонения начинается от 3 мм на пункте Drag и достигает максимального значения на пункте NKLG со значением 13 мм. Это свидетельствует о том, что зависимость точности позиционирования от длины базовой линии незначительна и ей можно пренебречь [106].

Результаты исследования показывают, что высокоточные координаты могут быть получены с использованием дифференциальных измерений относительно нескольких станций управления МГС, даже если принять во внимание, что расстояние до ближайшей станции может составлять несколько сотен километров. На самом деле для достижения этой точности необходимы длительные сеансы наблюдений и длительная и трудоемкая постобработка. Однако требуется исправить только одну станцию в определенном месте, чтобы получить очень точные координаты станции [106].

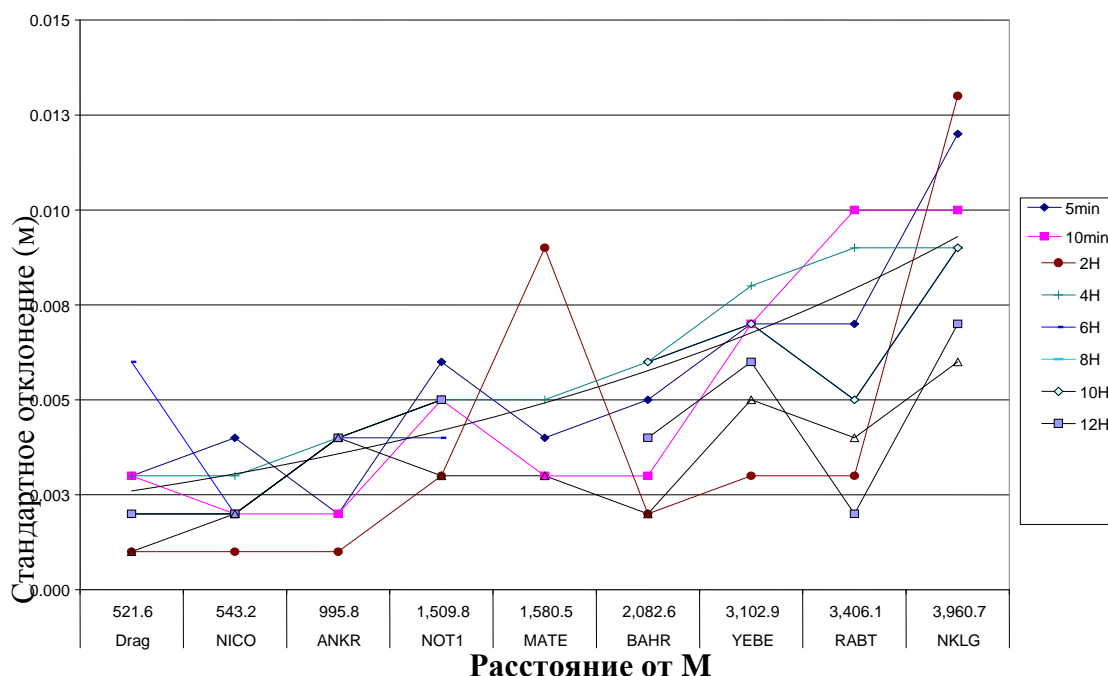


Рисунок 16 – Оценки стандартного отклонения, полученные на различных станциях МГС, при различном времени наблюдения и точных эфемеридах

*Короткие и длинные сеансы измерений.* Путем изменения времени сеанса наблюдений результаты, как правило, получаются более стабильными при длительности сессий более 6 ч. Это следует из результатов (таблица 10), согласно которым 12 ч и 6 ч сеансы оказываются похожими. За исключением базовых линий длиной более 3000 км, решение для определения планового и высотного положения можно рассматривать как постоянное для большинства базовых линий при использовании 8 ч сеанса наблюдений. Стандартное отклонение в плановом и высотном отношении после 8 ч составляет 6 мм и 11 мм соответственно. В базовых линиях длиннее, чем 3000 км, результаты можно получить при наблюдении в течение 8 ч, но стандартное отклонение в плане и по высоте увеличится до 25 мм и 45 мм. Сбор данных в течение 6 ч представляется достаточным для целей создания опорной сети. Таким образом, можно с уверенностью сделать вывод о том, что геодезическая точность в геодезической планиметрии достижима при использовании ГНСС-измерений в течение 8 ч в статическом режиме относительным методом [106].

Таблица 10 – Стандартное отклонение в плане и по высоте относительно времени наблюдений после исключения станций YEVE, RABT и NKLG

Продолжительность сеанса наблюдений	Стандартное отклонение в плане, мм	Стандартное отклонение по высоте, мм
15 мин.	498,6	503,2
30 мин.	285,3	268,2
1 ч	83,7	79,0
2 ч	46,4	41,6
4 ч	21,4	24,1
6 ч	16,2	21,8
8 ч	6,0	11,0
10 ч	28,5	26,2
12 ч	17,2	20,6

*Высокий и низкий уровень угла отсечки.* Что касается изменений угла отсечки, которые будут использоваться, хорошо известно, что большой угол отсечки снижает точность из-за меньшего числа спутников в поле зрения приемника. С другой стороны, малое значение угла отсечки также может привести к снижению точности из-за большого влияния тропосферной задержки для спутников, наблюдаемых под малым углом (таблица 11).

Таблица 11 – Стандартное отклонение в плане и по высоте относительно изменения угла отсечки

Угол отсечки	Стандартное отклонение в плане, мм	Стандартное отклонение по высоте, мм
10°	44,7	34,5
15°	31,2	25,0
20°	21,5	23,8
25°	24,2	21,3
30°	27,8	24,6

Было установлено, что оптимальный угол отсечки должен составлять 22°. Значение стандартного отклонения в плане и по высоте будет находиться в диапазоне 22 мм и 22 мм соответственно. Оба значения угла, равные 10° и 30°, дают большее стандартное отклонение величиной 44 мм и 34 мм для планового и высотного стандартного отклонения [106].

### 3.2 Сеть Кувейта

Выполнялись оценка методики координатных определений с использованием двухчастотных приемников в аспекте достижения требуемой точности и сравнение результатов использования двухчастотных DGPS-приемников [27].

Сравнение результатов измерений методами относительности и OmniSTAR осуществляется для оценки полученных результатов (координат) [12].

Использовалось ПО LEICA GEO OFFICE(LGO). Реальный объект состоял из 14 пунктов и одного опорного (базового) пункта (рисунок 17 и таблица 12). Двухчас-

тотный GPS-приемник LEICA RTKGPS 1200 был установлен на пункте (NGN95), который является пунктом сети DGPS. Режим измерений – «статика», в ряде случаев – быстрый статический с интервалом записи 5 с [12, 108].

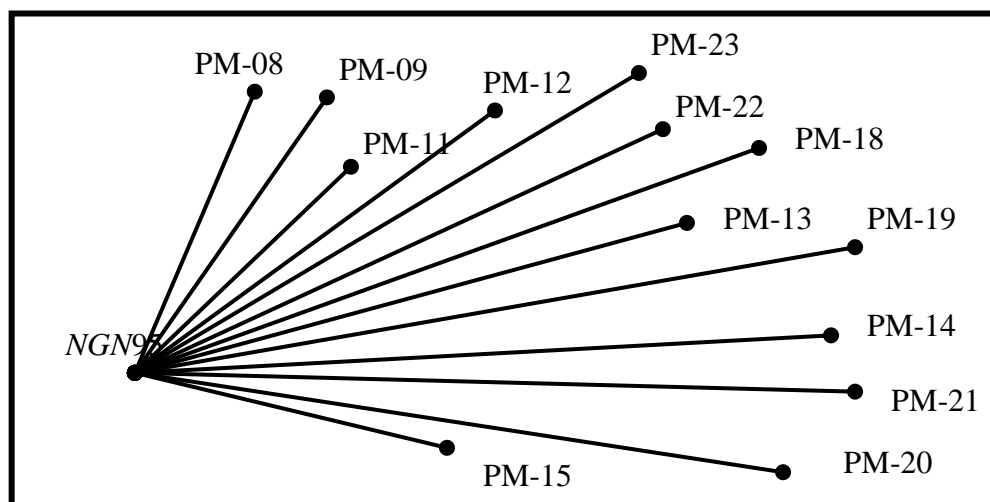


Рисунок 17 – Схема GPS-измерений

Таблица 12 – Расстояния от базового пункта до пунктов сети

NGN95	PM-08	PM-09	PM-11	PM-12	PM-13	PM-14	PM-15
Расстояние, м	2920	3453	5119	6110	5601	5910	6467
NGN95	PM-17	PM-18	PM-19	PM-20	PM-21	PM-22	PM-23
Расстояние, м	7516	8575	9416	9775	8330	6743	6222

Угол отсечки  $10^\circ$ , минимальное число спутников четыре. Измерения выполнялись последовательно от пункта PM-08 до PM-23 в режиме «быстрая статика» с временем инициализации и 10 мин. Число спутников было 4 – 9. Параметр GDOP менялся 2,3 – 4,0.

Из таблиц 13 и 14 можно сделать вывод о том, что разброс полученных расхождений находится около значения 0,000, и в некоторых случаях есть несколько больших расхождений.

Были вычислены соответствующие статистические параметры (максимальное, минимальное, среднее и стандартное отклонение) для расхождений координат ( $\Delta E$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta P$ ), представленные в таблице 14.

Таблица 13 – Результаты уравнивания фазовых измерений и измерений сети OmniSTAR

№ точки	Фазовое измерение		OmniSTAR	
	E, м	N, м	E, м	N, м
PM-08	236618,466	3182526,913	236619,791	3182528,368
PM-09	237328,137	3182535,806	237326,614	3182537,273
PM-11	239251,862	3182558,970	239253,492	3182560,490
PM-12	240337,101	3182527,901	240339,251	3182530,111
PM-13	240165,606	3181077,388	240167,186	3181079,028
PM-14	240514,765	3180383,594	240517,075	3180385,934
PM-15	240999,488	3179448,527	241001,385	3179450,481
PM-17	241931,228	3182088,399	241933,408	3182085,649
PM-18	243123,530	3181387,700	243125,200	3181385,830
PM-19	243996,530	3181079,872	243998,870	3181077,062
PM-20	244364,367	3179864,487	244365,927	3179865,947
PM-21	242934,016	3180318,405	242932,036	3180320,375
PM-22	241343,872	3180193,391	241345,122	3180194,961

Таблица 14 – Расхождения между фазовыми измерениями и измерениями мн сети OmniSTAR

№ точки	$\Delta E$ , м	$\Delta N$ , м	$\Delta P$ , м
PM-08	1,325	1,455	1,968
PM-09	-1,523	1,467	2,114
PM-11	1,630	1,520	2,229
PM-12	2,150	2,210	3,083
PM-13	1,580	1,640	2,277
PM-14	2,310	2,340	3,288
PM-15	1,897	1,954	2,723
PM-17	2,180	-2,750	3,509
PM-18	1,670	-1,870	2,507
PM-19	2,340	-2,810	3,657
PM-20	1,560	1,460	2,137
PM-21	-1,980	1,970	2,793
PM-22	1,250	1,570	2,006

Таблица 15 – Максимальное, минимальное и стандартное отклонение

Отклонение	$\Delta E$ , м	$\Delta N$ , м	$\Delta P$ , м
стандартное	1,341	1,829	0,567
максимальное	2,340	2,340	3,657
минимальное	-1,980	-2,810	0,000

Из таблицы 15 видно, что для приведенного выше примера расхождение отклонений плановых координат точек  $\Delta P$  изменяется от 0,000 до 3,657 м, среднее значение минус 2,621 м, стандартное отклонение минус 0,567 м. Похожие результаты можно привести для других расхождений ( $\Delta E$ ) и ( $\Delta N$ ). Подтверждена экспериментально возможность уменьшения времени наблюдений на десятки процентов в разных условиях при соблюдении необходимой точности координирования для системы OmniSTAR [12].

### 3.3 Сеть Мекки

*Применение бортовых и точных эфемерид.* Существуют два способа обработки данных, основанные на количестве базовых станций. Первый основан на использовании только одной станции, второй предполагает использование трех базовых станций.

Пример расположения сети GPS в районе Святой Мекки показан на рисунке 18. Система наблюдений включает постоянно действующую на удалении до 30 км базовую станцию GPS, передающую данные на главный компьютер. Для координирования использовалось пять двухчастотных GPS-приемников LEICA GPS SR530. Пункт G182 являлся опорным для всей сети DGPS. Были выполнены измерения в режиме «Статика» с интервалом 2 с. Четыре приемника были установлены на других пунктах сети. Базовая станция была выбрана для обеспечения высокоточного позиционирования на обширной территории [15, 17].

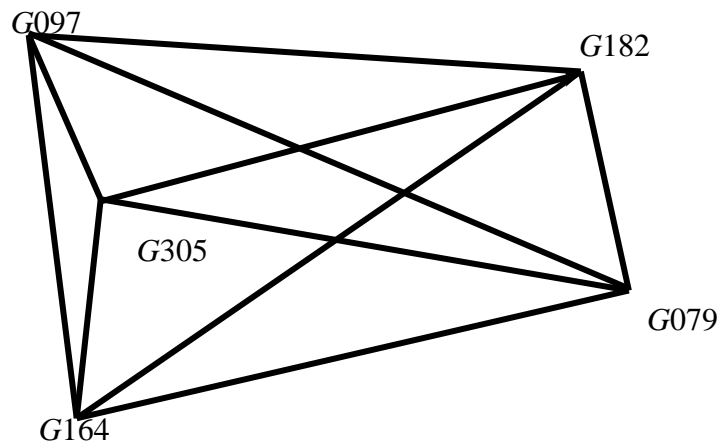


Рисунок 18 – Конфигурация сеть Мекки

В таблице 16 приведены координаты, полученные кодовым и фазовым решениями. Найдено расхождение координат соответствующих решений. Использовались модели тропосферы Хопфилд, модели ионосферы (ion-free), точности эфемерид и угол отсечки  $15^\circ$ , которые приняты в качестве базовых для оценки точности координирования. Это мы рассмотрим ниже [15].

Таблица 16 – Кодовые и фазовые решения

Пункт	Кодовое решение			Фазовое решение (принятая величина)		
	Y, м	X, м	H, м	Y, м	X, м	H, м
G-079	604847,109	2358799,827	344,232	604847,605	2358799,313	344,156
G-097	581954,337	2379143,209	265,318	581954,305	2379142,648	264,745
G-164	584332,702	2353111,952	222,583	584333,051	2353112,241	222,242
G-182 (база)	603577,634	2377008,347	418,155	603577,634	2377008,347	418,155
M-305	584002,934	2366022,109	273,465	584003,240	2366022,323	273,124

Для анализа измерений нами использовалась программа Leica Geo Office (LGO). Она позволила выполнить быструю обработку небольших одно- и двух-частотных измерений, параметров трансформирования геодезических сетей, разрешения неоднозначности длинных базовых линий, моделирования тропосферы и ионосферы, оценки часов и времени передачи, комбинирования различных типов приемников, моделирования траектории движения космических приемников системы ГНСС, оценки параметров вращения Земли и уравнивания геодезической сети как свободной [28].

Расхождения между фазовым решением по умолчанию и фазовым решением с заменой бортовых на точные. Каждый раз использовались одни и те же параметры за исключением первого запуска, когда применялись бортовые эфемериды и точные эфемериды второго запуска Международной ГНСС Службы. Разность между полученными координатами показана в таблице 17 [105].

Плановое положение изменяется в широком диапазоне от 0,53 до 0,61 мм. Диапазон изменений высоты от 0,83 до 1,94 мм. В качестве замечания можно отметить то, насколько точные эфемериды улучшают решение по сравнению с распространяемыми эфемеридами.

Таблица 17 – Плановое положение и высота пунктов при использовании двух типов эфемерид от различных базовых станций МГС

Пункт	$\Delta E$ , мм	$\Delta N$ , мм	$\Delta H$ , мм
G-079	0,23	0,51	1,40
G-097	0,13	0,45	0,83
G-164	0,52	0,54	0,98
G-182	0,00	0,00	0,00
M-305	0,71	0,69	1,94

Модели ионосферы. Для исследования влияния ионосферной ошибки на результаты измерений было выполнено несколько фазовых измерений сети. В данном исследовании использовалась модель ионосферы (ion-free) с принятыми значениями. Каждый раз использовались одни и те же параметры за исключением первого запуска, при котором использовались следующие модели:

- рассчитанная модель;
- стандартная модель;
- глобальная/ региональная модель.

Как следует из таблицы 18, координаты изменяются в близком субмиллиметровом диапазоне для всех типов модели ионосферы, но в случае использования модели (ion-free), а не других моделей ионосферы в качестве наиболее общей модели [107].

Таблица 18 – Расхождения между решениями по ионосферным моделям

	Точка	$\Delta E$ , мм	$\Delta N$ , мм	$\Delta H$ , мм
Расхождения между решением по умолчанию и решением с заменой ионосферной модели на рассчитанную модель	G-079	0,00	0,00	0,01
	G-097	0,01	0,00	-0,03
	G-164	0,00	0,00	0,00
	G-182	0,00	0,00	0,00
	M-305	0,11	-0,11	0,04
Расхождения между решением по умолчанию и решением с заменой ионосферной модели на стандартную модель	G-079	0,00	0,00	-0,01
	G-097	0,00	0,00	0,01
	G-164	0,01	-0,03	-0,01
	G-182	0,00	0,00	0,00
	M-305	-0,22	0,04	-0,11
Расхождения между решением по умолчанию и решением с заменой ионосферной модели на глобальную модель	G-079	0,00	0,00	0,00
	G-097	0,00	0,00	0,01
	G-164	0,00	0,00	0,00
	G-182	0,00	0,00	0,00
	M-305	0,34	0,14	0,13

*Модели тропосферы.* Для исследования влияния ошибок тропосферы на результаты измерений выполнялась обработка фазовых измерений сети. Каждый раз использовались одни и те же параметры, за исключением первого запуска, с использованием следующих моделей:

- упрощенная модель Хопфилд;
- модель Саастамойнена;
- модель Эссена и Фрома;
- без модели тропосферы.

В заключение можно подтвердить, что влияние тропосферной модели на высотную составляющую гораздо сильнее, чем на плановую. Расхождения между различными моделями тропосферы небольшие, но значительны при отсутствии модели как таковой (таблица 19). Таким образом, использование модели тропосферы является необходимым [106].

Таблица 19 – Расхождения между решениями тропосферных моделей

	Пункт	$\Delta E$ , мм	$\Delta N$ , мм	$\Delta H$ , мм
Расхождения между фазовыми решениями по умолчанию и решениями с тропосферной моделью Хопфилда	G-079	-1,0	0,4	9,6
	G-097	0,2	0,5	20,3
	G-164	0,1	1,0	26,3
	G-182	0,0	0,0	0,0
	M-305	0,2	0,6	19,1
Расхождения между фазовыми решениями по умолчанию и решениями с тропосферной моделью Саастамойнена	G-079	-0,1	0,0	0,3
	G-097	0,1	0,1	0,7
	G-164	0,1	0,1	1,0
	G-182	0,0	0,0	0,0
	M-305	0,0	0,1	0,7
Расхождения между фазовыми решениями по умолчанию и решениями с тропосферной моделью Эссена и Фрома	G-079	0,0	-0,2	-7,4
	G-097	0,1	-0,3	-16,2
	G-164	0,1	-0,6	-21,1
	G-182	0,0	0,0	0,0
	M-305	0,2	-0,3	-15,6
Расхождения между фазовыми решениями по умолчанию и решениями без использования тропосферной модели	G-079	-13,6	25,9	-83,4
	G-097	13,5	-5,6	-143,7
	G-164	4,5	20,2	-217,8
	G-182	0,0	0,0	0,0
	M-305	16,7	20,0	-132,9

С учетом упрощенной модели тропосферы Хопфилд нами были получены расхождения фазовых решений в сравнении с вычисленными значениями координаты. Расхождения по  $Y$  изменялись от 0,8 до 1,4 мм, среднее расхождение равно 0,1 мм и стандартное отклонение 0,5 мм. Расхождения по  $X$  изменялись от 1,4 до 1,6 мм, среднее значение 0,3 мм, стандартное отклонение 0,6 мм. Расхождения по высоте изменялись от 11,4 до 32,2 мм [106].

*Кинематические фазовые решения.* Решения, полученные без использования тропосферной модели, по  $Y$  изменялись от 13,3 до 37,5 мм, среднее значение изменений минус 21,5 мм, стандартное отклонение минус 6,4 мм. Расхождения по  $X$  изменялись от минус 2,2 до 25 мм, среднее значение минус 9,7 мм, а стандартное отклонение минус 5,5 мм. Расхождения по высоте изменялись в диапазоне от

минус 72,3 до минус 189,0 мм, среднее значение минус 110,5 мм, а стандартное отклонение минус 21,8 мм [17].

При выполнении второго цикла уравнивания с применением только фазовых измерений на базовых станциях использовалась также модель тропосферы Хопфилд. На следующем этапе обработки изменялась только модель тропосферы при фиксированных значениях остальных параметров. Результаты анализа приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Результаты анализа (см)

	Разность между одной и несколькими базовыми станциями с фазовыми решениями, см				Разность между решениями упрощенной модели Хопфилд и модели Хопфилд с фазовыми решениями, см			
	макс. откл.	мин. откл.	станд. откл.	среднее откл.	макс. откл.	мин. откл.	станд. откл.	среднее откл.
X	2,50	-2,08	0,67	-0,12	0,14	-0,08	0,05	0,01
Y	2,06	-2,08	0,70	0,02	0,16	-0,14	0,06	0,03
Z	8,20	-6,60	2,00	0,72	3,22	1,14	0,44	1,88
	Разность между несколькими базовыми станциями кодовыми решениями и одной базовой станцией с фазовыми решениями, см				Разность между решениями упрощенной модели Хопфилд с кодовыми решениями и модели Хопфилд с фазовыми решениями, см			
	макс	мин	станд. откл.	среднее	макс	мин	станд. откл.	среднее
X	90,00	-79,00	36,40	-0,22	84,00	-16,40	24,00	17,60
Y	31,50	-49,00	16,00	-19,00	73,19	-62,68	26,70	-10,00
Z	178,00	-169,00	74,00	-9,50	409,09	-351,83	154,47	-24,60

Использование нескольких базовых станций при кодовых измерениях на примере геодезической сети святой Мекки подтвердило повышение точности координирования по сравнению с одиночной станцией. При фазовых измерениях с помощью одной, а не нескольких базовых станций точность координирования при коротких расстояниях (до 10 км) практически не снижается [17].

### 3.4 Выводы

В разделе приведены примеры улучшения качества координатных определений с использованием ГНСС-технологий.

Для нескольких вариантов оптимизации анализ конкретных результатов позволяет рекомендовать в практическом использовании некоторые параметры, условия выполнения работ.

Исследовались следующие влияющие на точность и организацию координатных определений факторы:

- длительность обоснование выбора модели ошибок тропосферы путем сравнения четырех известных моделей;
- количество стационарных приемников, используемых в качестве эталона;
- особенности фазовых решений;
- различия между фазовым решением и OmniStar;
- наилучший угол отсечки сектора захвата спутников;
- интервал между наблюдениями (сеансами).

В качестве примеров были исследованы реальные наблюдения в сети Египта, междугородной сети Мекки и средние и короткие расстояния сети Кувейта.

Таким образом, можно с уверенностью сделать вывод о том, что точность на геодезической плоскости достижима при использовании GPS-измерений в течение 8 ч в статическом режиме относительным методом. Зависимость точности позиционирования от длины базовой линии незначительна, и ей можно пренебречь, оптимальный угол отсечки должен составлять  $20^\circ$ .

Подтверждена экспериментально возможность уменьшения времени наблюдений на десятки процентов в разных условиях при соблюдении необходимой точности координирования для системы OmniSTAR.

Использование точных эфемерид, а не бортовых эфемерид, модели ионосферы (ion-free), моделей атмосферы Хопфилд или Саастамойнена позволяет зна-

чительно улучшить результаты для всех базовых линий. Также установлено, что тропосферные модели оказывают влияние на методику наблюдений.

Использование нескольких базовых станций при кодовых измерениях на примере геодезической сети святой Мекки подтвердило повышение точности координирования по сравнению с одиночной станцией. При фазовых измерениях с помощью одной, а не нескольких базовых станций точность координирования при коротких расстояниях (до 10 км) практически не снижается.

## 4 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ

### 4.1 Модели деформации

При мониторинге природно-технических систем геодезическими методами необходим системный подход при математической обработке наблюдений и выборе адекватных прогнозных моделей [2, 4]. Иерархия моделей в геодезическом анализе деформаций представлена на рисунке 19. При очень часто используемых в настоящее время ГНСС-технологиях [5, 1] должны быть учтены точностные параметры координатных определений и высокая временная частота их получения. Последующая корректная математическая обработка должна включать обязательным образом определение (выбор) аппроксимирующих моделей. Практическим важным следствием являются обоснованная оптимизация проектирования мостов и слежения за их безопасным состоянием в процессе эксплуатации.

В данном разделе сделана оценка комплексной системы мониторинга для наблюдения и оценки структурных деформаций мостов с использованием геодезических методов и современных систем геодезического позиционирования (ГНСС). Важным является выбор и реализация математических основ комплексного анализа результатов измерений различных видов. Смещения моста зависят не только от времени. Следует сказать о влиянии транспортного движения и ветра на природно-техническую систему вантового моста. Это усложняет задачу построения прогнозной модели.

В динамической модели, в дополнение к кинематической модели, взаимосвязь между деформациями и влияющими факторами также принимается во внимание [20].

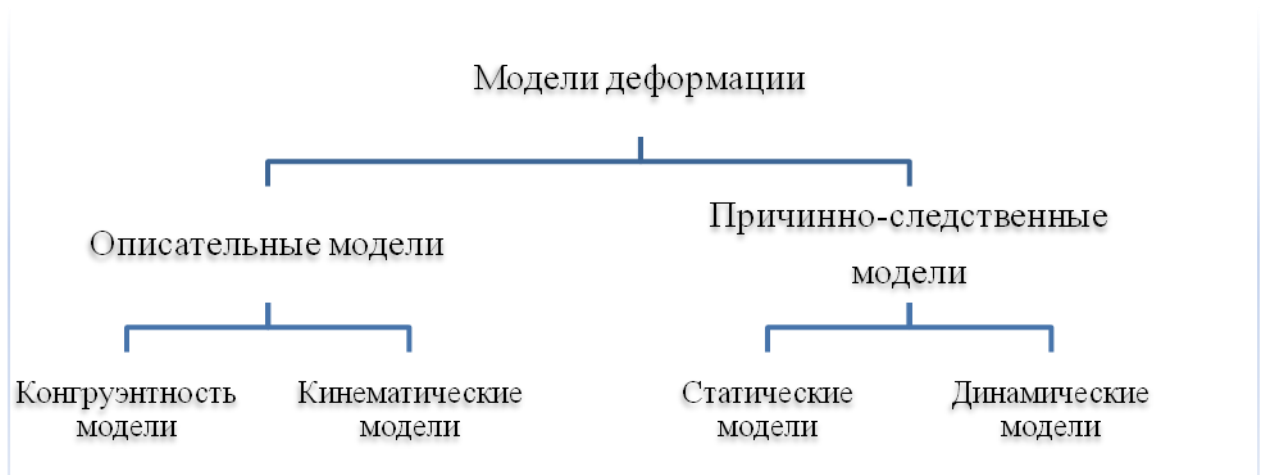


Рисунок 19 – Иерархия моделей в геодезическом анализе деформаций [14]

Для анализа в пространстве и времени существует в принципе два класса моделей. Модели сравнения геометрических свойств объекта в двух (или более) точках времени называются моделями сравнения. Они учитывают фактор времени лишь косвенно [51]. Модели, описывающие деформацию на основе заданной или предполагаемой функции времени (скорость, ускорение и т.д.), называют кинематическими. Характеристика и классификация моделей деформации представлены в таблице 21.

Причинно-следственные модели делятся на два вида:

- а) динамические системы: деформация как выходной сигнал является функцией времени и нагрузок;
- б) статические системы можно рассматривать как частный случай динамических систем.

Модели данного типа немедленно реагируют на изменения причинных сил. Деформации являются функцией только измененных нагрузок [32].

Таблица 21 – Характеристика и классификация моделей деформации

Модель деформации	Сравнительная модель	Кинематическая модель	Статическая модель	Динамическая модель
Время	Нет моделирования	Движение как функции времени	Нет моделирования	Движение в зависимости от времени и нагрузки
Действующие силы	Нет моделирования	Нет моделирования	Смещение в зависимости от нагрузки	
Состояние объекта	Преимущественно в равновесии	Постоянно в движении	Преимущественно в равновесии	Постоянно в движении

#### 4.2 Математические алгоритмы

*Фильтр Калмана.* Имеется несколько математических алгоритмов обработки экспериментальных данных с возможностью выбора аппроксимирующих моделей. Конечно, в первую очередь, это метод наименьших квадратов (МНК), возможно, с модификациями. Ниже очень кратко, ввиду его распространенности, показан алгоритм нахождения параметров аппроксимирующей модели. Безусловно, для мониторинга с использованием ГНСС и вообще для любого мониторинга весомым аргументом является время.

Данная постановка вопроса требует процедуры оптимизации в смысле выбора некоторого критерия полезности. Это может быть набор оценок параметров наблюдаемых пунктов и варианты их уточнения. Это возможно делать итерационно, пока целевая функция несущественно изменяется между итерациями. Таким вариантом решения может быть алгоритм Левенберга-Марквардт для нелинейных наименьших квадратов [59, 41]:

Возможно использование многих опорных математических функций с разнообразным набором параметров (коэффициентов). При этом неизбежно присутствует проблема выбора наиболее адекватной математической модели на основе экспериментальных данных, им соответствующей. Общий (канонический) вид многочлена степени  $j$  [59, 9]:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_jx^j = a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x^k$$

Общее выражение для любой ошибки с использованием метода наименьших квадратов [21]:

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^j \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{j+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^j & \sum x_i^{j+1} & \sum x_i^{j+2} & \dots & \sum x_i^{j+j} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (x_i y_i) \\ \sum (x_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum (x_i^j y_i) \end{bmatrix}.$$

После традиционной линейризации имеем матричное выражение:

$$AX = B.$$

$$\frac{d\Delta}{da_n} = (t_i - t_0)^n, \quad \frac{d\Delta}{da_0} = 1$$

$$A \cdot \Delta + L = V$$

$$A = \begin{bmatrix} (t_1 - t_0)^n & (t_1 - t_0)^{n-1} & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ (t_i - t_0)^n & (t_i - t_0)^{n-1} & \dots & 1 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot L)$$

Но существует много иных подходов к моделированию природно-технических систем, основанных на различных математических теориях и мето-

дах. Например, в работах [104, 106, 107] предложено считать адекватным математическим аппаратом обработки комплексных разнородных геодезических и геофизических наблюдений аппарат рекуррентного адаптивного фильтра Калмана-Бьюси (ФКБ). Алгоритм ФКБ позволяет определять оптимальные в смысле критерия  $\min trK_{X_R}(X, t)$  (минимума обобщенной дисперсии) текущие оценки расширенного вектора параметров состояний  $\hat{X}_R(X, t)$ , а также одношаговые прогнозные фоновые оценки (условное математическое ожидание) этого вектора. Для обработки ГНСС-определений деформаций вантовых мостов нами был использован, в частности, фильтр Калмана. Рисунок 20 иллюстрирует алгоритм с его использованием [110, 111].

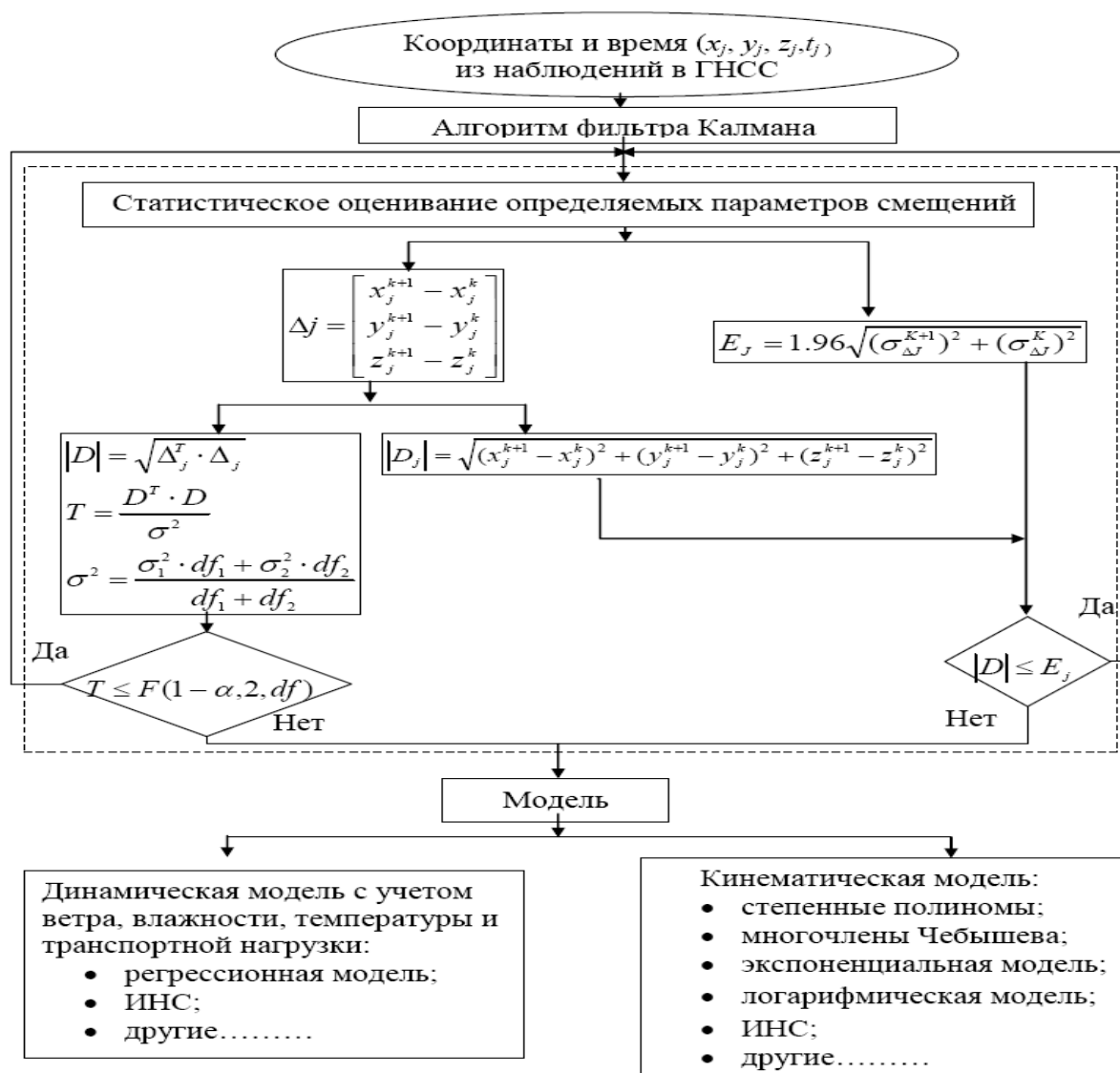


Рисунок 20 – Блок-схема алгоритма нахождения аппроксимационной модели с использованием фильтра Калмана

При фазовом подходе в качестве методики оценки параметров выбран фильтр Калмана. Фильтр Калмана объединяет знания системной динамики и статистической природы ошибки системы для оценки неизвестных положений. Положения в момент  $t_k$  оцениваются с использованием измерений, получаемых во время  $t_k$ , и оцениваемое положение (во время  $t_{k-1}$ ) незамедлительно до измерений. Процедура состоит из четырех шагов (в соответствии с приложениями А и Б): прогноз, вычисление новой последовательности, вычисление качественной категории по Калману и обновление положения [56], как показано на рисунке 21.

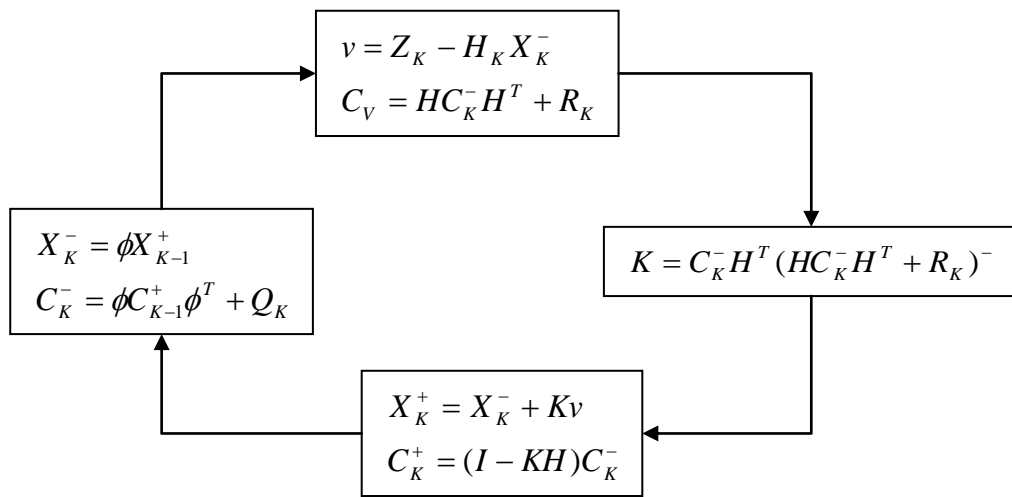


Рисунок 21 – Цикл линейризации фильтра Калмана

В соответствии с рисунком 21:

- $X_k$  – вектор состояния, оцениваемый в эпоху  $k$ ;
- $C_k$  – ковариационная матрица вектора состояния  $X_k$  в эпоху  $k$ ;
- $Z_k$  – вектор наблюдений в эпоху  $k$ ;
- $Q_k$  – матрица шумов обработки в эпоху  $k$ ;
- $R_k$  – ковариационная матрица измерений  $Z_k$ ;
- $\phi$  – матрица переходов;
- $K$  – коэффициент Калмана;
- $v$  – новая последовательность;
- $I$  – единичная матрица;

$H$  – матрица плана, вычисленная путем взятия производных от наблюдений с учётом оцениваемых состояний.

Знак верхнего индекса "–" свидетельствует о том, что матрица или вектор состояния предшествует новому шагу, а знак верхнего индекса "+" означает, что матрица или вектор состояния получены после нового шага [66]. Можно использовать и другие фильтры, например фильтр адаптивного процесса (в соответствии с приложением В).

*Основные положения теории информационных нейронных сетей.* Нейронной сетью можно назвать совокупность компонентов, соединенных и взаимодействующих между собой. Эти компоненты (иначе их называют еще нейронами или узлами) являются простыми процессорами, которые имеют некоторое правило комбинирования входных слоёв и правило активизации, с помощью которого можно вычислить выходной слой по совокупности входных слоёв. Выходной слой компоненты может передаваться другим компонентам по взвешенным связям, и каждая из них по-своему связана с весовым коэффициентом или весом. Передаваемый сигнал может усиливаться или ослабляться, и это зависит от значения весового коэффициента. На рисунке 22 показана структурная схема информационного нейрона, а также указаны обозначения его математической модели [1, 18]. Программы нейронных сетей представлены в приложении Д.

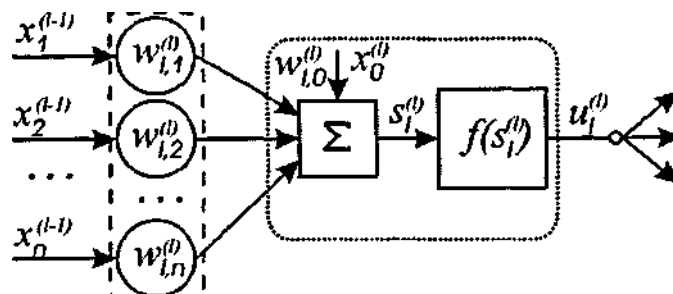


Рисунок 22 – Информационный нейрон

Таким образом, действие нейрона может быть описано уравнениями [27]:

$$s_i = \sum_{k=1}^n w_{ik} x_k + w_{i0} x_0 = \sum_{j=0}^n w_{ij} x_j,$$

$$u_i = f(s_i),$$

где  $x_i$  – входные сигналы нейрона,

$u_i$  – выходной сигнал,

$w_{i,j}$  – весовые коэффициенты,

$s_i$  – суммарное входное воздействие на нейрон, активационная функция.

В каждом информационном нейроне для инициализации сети введены специально вход  $x_0$  и коэффициент связи  $w_0$  (он также может быть назван коэффициентом смещения); обычно  $x_0 = +1$ ; все коэффициенты  $w_0$ , как и остальные  $w_j$  ( $j=1, \dots, n$ ), настраиваются в процессе обучения.

Информационные нейронные сети различаются своей архитектурой: у них разные структуры связей между нейронами (рисунок 23), разное количество слоев, своеобразные алгоритмы обучения, непохожие функции активации нейронов. В этом плане можно назвать:

- сеть в состоянии статики;
- сеть в состоянии динамики;
- нечеткие нейронные сети;
- сети, обладающие самоорганизацией.

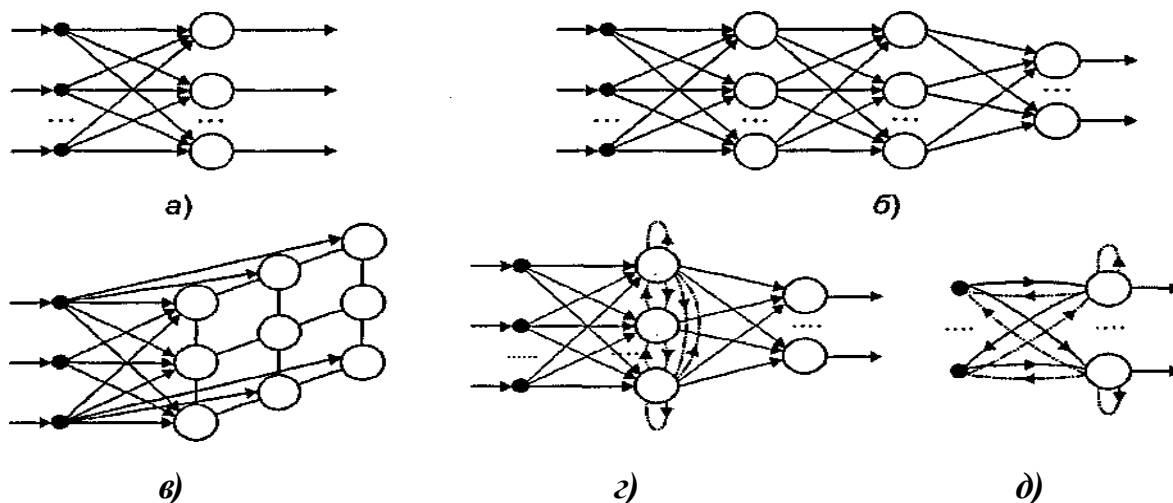


Рисунок 23 – Структуры наиболее часто встречающихся ИНС:

а) сеть из одного слоя; б) сеть из многих слоёв; в) сети Кохонена;

г) сети Элмана; д) сети Хопфилда

Примечание – "\_\_\_" связь без задержки, "...." связь с единичной задержкой.

Хотя виды ИНС чрезвычайно разнообразны, некоторые из них получили наибольшее распространение, и к ним относятся, в первую очередь, многослойные статические нейронные сети без обратных связей (в приложениях нейронных сетей их насчитывается 80 %). Меньше распространены сети Хопфилда, и реже всего встречаются сети Кохонена [1, 28]. Причина этого обстоятельства в том, что многослойная полносвязная информационная нейронная сеть прямого распространения, если сравнивать ее с другими видами сетей, имеет самую большую информационную емкость и способность к обобщению [1].

Если рассматривать сети прямого распространения или статические сети, то слои в них связаны однонаправлено, а выход каждого нейрона имеет определенную связь со всеми входами нейронов последующего слоя. У данных сетей в их структуре отсутствуют обратные связи и динамические компоненты, просматривается прямая зависимость от заданного множества на входе, зато выход не зависит от предыдущих состояний сети.

Несмотря на то, что один нейрон может производить самые простые операции распознавания, сила нейронных вычислений зависит от соединений нейронов в сетях. Реальная нейронная сеть может иметь в своем составе один или большее число слоев, т.е. характеризоваться как однослойная или многослойная. Самая простая сеть, в составе которой один слой с входными элементами  $n$  и нейронами  $k$ , показана на рисунке 24, а, б.

Подчеркнем, что входные нейроны с поданным на них вектором  $x$ , который кодирует входное воздействие или образ внешней среды, используются только для распределения входных сигналов [1]. Они не совершают никакие вычисления и, значит, не могут считаться преобразовательным слоем. В каждом нейроне есть суммирующий элемент, формирующий скалярный выход  $s_i$ .

Совокупность скалярных функций  $s_i$  объединяется в  $k$ -элементный вектор входа  $s$  функции активации слоя  $f$ . Выходы слоя нейронов формируют вектор-столбец  $y$ , и, таким образом, описание слоя нейронов имеет вид:

$$y = f(w_0x + w_0),$$

где  $w_0$  – вектор коэффициентов смещений нейронов.

Компоненты вектора входа передаются в сеть с помощью матрицы весов  $w$ .

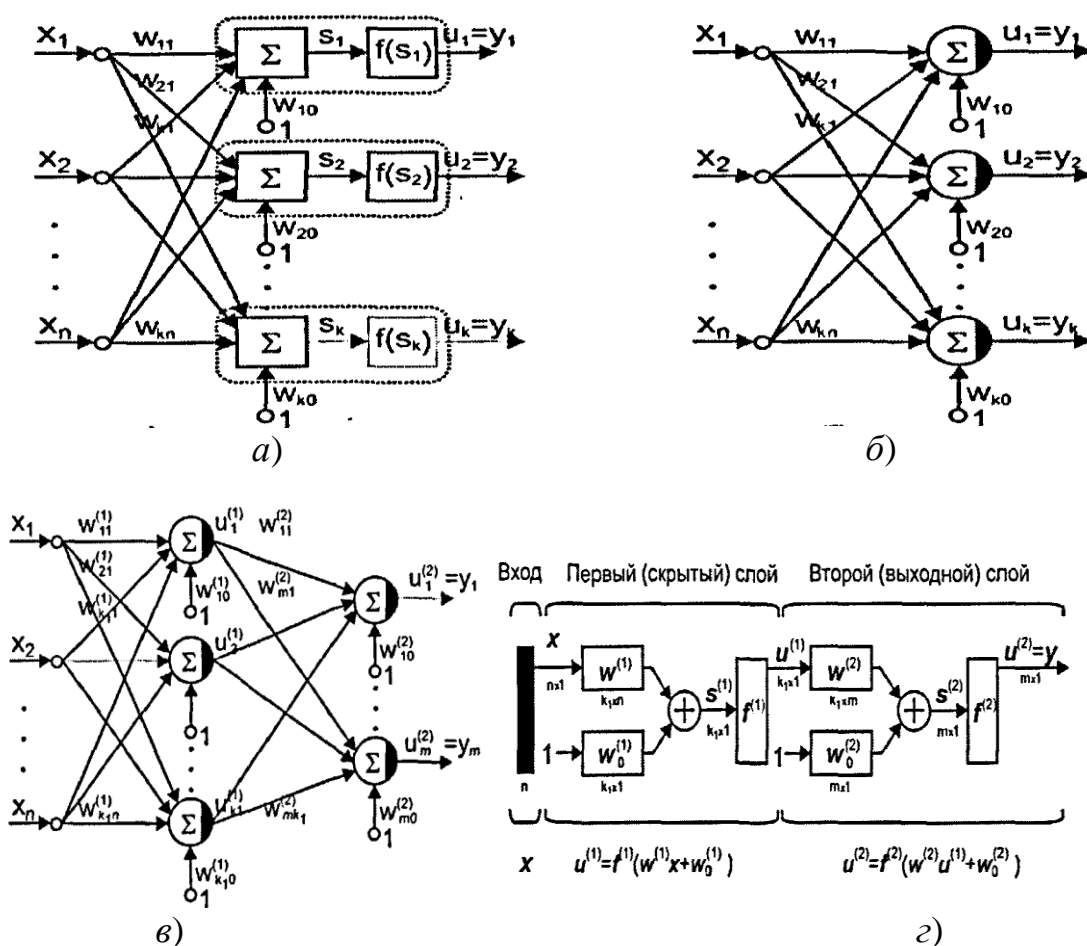


Рисунок 24 – Классификация информационных нейронных сетей:

*a), б)* однослойная; *в)* двухслойная; *г)* нейронные сети

В составе многослойной сети нейроны расположены на разных уровнях, при этом, кроме входного и выходного слоев, присутствует еще как минимум один скрытый, т.е. внутренний слой. На рисунке 24, *в* изображена двухслойная нейронная сеть, которая состоит из  $k_1$  нейронов в единственном скрытом слое и  $m_1$  нейронов во втором (выходном) слое. Обычно в каждом слое используется одна и та же

активационная функция. К тому же выходы каждого промежуточного слоя являются входами для следующего слоя [59]. Следовательно, выходной слой можно рассматривать как один слой сети, у которой  $k_i$  входы,  $m$  нейроны и  $k_1 m$  матрица весов  $w^{(2)}$ . Данную двухслойную сеть можно представить также в форме укрупненной структурной схемы (рисунок 24 г). Выход последнего слоя  $u^{(2)}$  обозначается через  $y$ , чтобы указать, что выход последнего слоя представляет собой сетевой выход. Выходной сигнал  $i$ -го нейрона скрытого слоя может быть описан в виде функции (4)

$$u_i^{(1)} = f\left(\sum_{j=0}^n w_{ij}^{(1)} x_j\right), \quad (4)$$

индекс "0" которой соответствует сигналу и весам поляризации, вносимым в соответствующие вектора входов и матрицы весов.  $k$ -й нейрон в выходном слое вырабатывает выходной сигнал, который можно определить как (5):

$$y_k = f\left(\sum_{i=0}^{k_1} w_{ki}^{(2)} u_i^{(1)}\right) = f\left(\sum_{i=0}^{k_1} w_{ki}^{(2)} \left(f\left(\sum_{j=0}^n w_{ij}^{(1)} x_j\right)\right)\right), \quad (5)$$

Не теряет актуальности вопрос, для какого класса задач использование нейронной сети, построенной по новым признакам, наиболее эффективно. В этом плане можно рассматривать две основные группы задач: 1) задачи, которые хорошо представляются в логическом базисе нейросети, а именно при помощи взвешенного суммирования (в этом случае, как правило, нет необходимости в обучении на экспериментальном материале); 2) задачи, при решении которых необходим процесс обучения на реальном экспериментальном материале (обычно это задачи, которые трудно формализуются или не формализуются совсем). Посредством данного подхода можно получить преимущества, для которых и используются нейросети. Рассмотрим их подробнее.

Самое важное свойство ИНС, определяющее её огромный потенциал и широкие возможности, заключается в том, что все звенья сети обрабатывают информацию параллельно, и это значительно ускоряет процесс вычислений. Как отмечается во многих источниках [59, 92], именно быстрое решение конкретной задачи является основной целью нейросетей.

Другой характерной особенностью сети можно назвать возможности применения интеграции сверхбольшой степени. При большом количестве межнейронных соединений сеть становится устойчивой к ошибкам, которые появляются на некоторых линиях: исправные линии берут на себя функции нарушенных связей, вследствие чего деятельность сети по существу остается не измененной [59].

Следует упомянуть и об еще одном важном свойстве ИНС - способности к обучению и обобщению накопленных знаний. Обучение информационной нейронной сети представляет собой процесс настройки весовых коэффициентов  $w_{i,j}$  ее компонентов, вследствие чего сеть решает конкретные задачи, а именно задачи распознавания, оптимизации, аппроксимации, управления. Подобные цели могут считаться достигнутыми, если они приобретают некоторый критерий качества (функционал или целевую функцию)  $E$ , минимальное значение  $\min_w E$  которого указывает на самое лучшее решение поставленной задачи [59].

Множество типов алгоритмов обучения определяется архитектурой сети, ее функциональным назначением, а также выбранной стратегией обучения, которая характеризуется использованием определенного подхода: это может быть обучение с учителем, самообучение (т. е. обучение без учителя) и смешанный тип обучения. Обучение однослойных и многослойных сетей производится в соответствии с первым из названных видов стратегий, при этом имеется в виду, что, кроме входных сигналов ИНС, входящих в состав вектора  $x$ , существуют также и целевые (ожидаемые) выходные сигналы сети  $d_i$ , входящие в состав вектора  $d$ . Все обучающие примеры в совокупности называются обучающей выборкой. Посредством этой выборки нейросеть осуществляет настройку в соответствии с неким правилом или алгоритмом, организация которого должна быть такова, чтобы фактические выход-

ные сигналы ИНС  $y_i$  стали бы принимать значения, как можно более близкие к прогнозируемым значениям  $d_i$ . При этом стремящийся к минимуму функционал  $E$  представляет собой соответствующую сумму ошибок по всему количеству обучающих примеров  $N$ :

сумма квадратов ошибок формула (6)

$$\Delta_{sse}(w) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m e_{jk}^2, \quad (6)$$

средняя квадратичная ошибка формула (7)

$$\Delta_{mse}(w) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m e_{jk}^2, \quad (7)$$

средняя абсолютная ошибка формула (8)

$$\Delta_{mse}(w) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m |e_{jk}|, \quad (8)$$

где  $m$  – число выходов в ИНС;

$e_{jk} = d_{jk} - y_{jk}$  – компонент вектора ошибки  $e$ .

Проанализируем базовые методы настройки коэффициентов ИНС, которые чаще всего встречаются при использовании статических информационных нейросетей. Подобрать веса многослойной сети с наибольшим эффектом возможно, если применить градиентные алгоритмы оптимизации [1, 82]. Действие алгоритмов итерационное, с определенными циклами обучения. Каждый цикл характеризуется тем, что сначала на вход сети по очереди подаются обучающие наблюдения; выходные значения, которые вычисляются с помощью выражений (4) и (5), сопоставляют, сравнивают с целевыми значениями; далее вычисляются ошибка и целевая функция. Их значения и соответствующие производные применяются для коррек-

тировки весов, затем происходит повтор всех действий [1]. Выбор начальной конфигурации сети носит случайный характер, и ход обучения прерывается, если проходит определенное число циклов, или если ошибка доходит до некоторого определённого уровня малости, или если заканчивается процесс уменьшения ошибки.

В соответствии с градиентными методами оптимизации производится уточнение вектора весов (обучение) по формуле (9) [94]

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w, \quad (9)$$

где  $\Delta w = \eta_r p(w)$ ,  $\eta_r$  – параметр скорости (коэффициент) обучения;

$p(w)$  – направление в многомерном пространстве  $w$ .

При обучении многослойной сети с использованием градиентных методов обязательна операция определения производных целевой функции относительно весов всех слоев сети с целью правильного выбора направления  $p(w)$ . Решение этой задачи очевидно лишь для весов выходного слоя. Для других слоев необходимо применить специальную стратегию, названную в теории информационных нейронных сетей алгоритмом обратного распространения ошибки [1, 92]. По своей сути этот алгоритм является процессом распределения сигналов ошибки от выходов ИНС к ее входам, по направлению, обратному прямому распространению сигналов в обычном рабочем режиме.

Методы, которые применяются в процессе обучения нейронных сетей, различаются выбором направления  $p(w)$ , но во многом сходны с методами определения экстремума функции у нескольких переменных. Последние из указанных методов можно разделить на 3 группы: 1) методы нулевого порядка, 2) методы первого порядка, 3) методы второго порядка.

При использовании метода нулевого порядка, чтобы найти экстремум, необходимы только данные о значениях функции в заданных точках.

Метод первого порядка применяет по настраиваемым параметрам градиент функционала ошибки. В этом случае различают метод скорейшего спуска

(градиентный алгоритм), многочисленные методы сопряженных градиентов и т.д. [88].

$$g(w) = \nabla E = \left[ \frac{\partial E}{\partial w_1}, \frac{\partial E}{\partial w_2}, \frac{\partial E}{\partial w_3}, \dots, \frac{\partial E}{\partial w_n} \right]^T.$$

При использовании методов второго порядка необходимо знать вторые производные функционала ошибки. В данной группе методов самым распространенным является метод Ньютона, который настраивает параметры с помощью матрицы Гессе, т.е. матрицы вторых частных производных целевой функции. По сравнению с методами сопряженного градиента метод Ньютона сходится быстрее, однако при вычислении гессиана затрат будет больше. Во избежание вычисления матрицы Гессе применяются разные способы ее замены приближенными выражениями, вследствие чего возникают так называемые квазиньютоновские алгоритмы (алгоритм Левенберга-Марквардта  $L_M$ , алгоритм метода переменной метрики  $BFGS$  и т.д.) [1, 94].

$$H(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_n \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_n \partial w_n} \end{bmatrix}.$$

Необходимо подчеркнуть, что во многих задачах в целях настройки весовых коэффициентов рациональнее действовать в соответствии с алгоритмом Левенберга-Марквардта, поскольку его эффективность во много раз выше эффективности других алгоритмов [27, 1].

Не менее важное свойство ИНС - это ее способность к обобщению приобретенных знаний, ввиду чего сеть, получившая тренировку на некотором множестве обучающих выборок  $L$ , генерирует прогнозируемые результаты в момент подачи на ее вход данных  $G$ , которые относятся к тому же множеству  $R$ , но не принимают непосредственное участие в ходе обучения (рисунок 25). То, что сеть способна ото-

бражать компоненты  $L$ , является показателем степени накопления обучающей информации, а умение распознавать данные, которые входят во множество  $G$ , но не используются для обучения, указывает на ее возможности генерализации (обобщения) знаний [1].

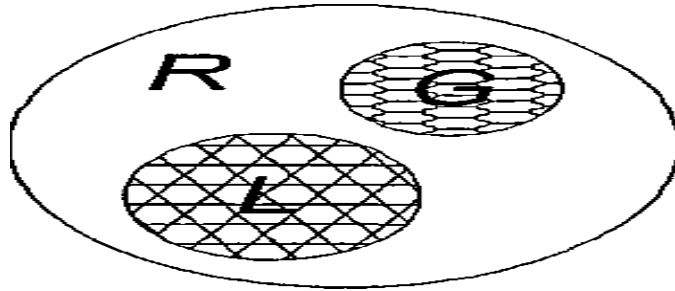


Рисунок. 25 – Иллюстрация разделения данных, которые подчиняются правилу  $R$ , на подмножества

В процессе обучения нейронных сетей происходит также явление переобучения, которое следует рассматривать в прочной связи с погрешностями обучения и обобщения. Сущность данного явления в том, что на компонентах обучающего множества ошибки обучения оказываются очень малыми, но если сети показывают новые данные, то погрешность значительно увеличивается. Это значит, что сеть заучила примеры, но не умеет решать задачи, т.е. адаптироваться к новым данным. Так как на ошибку обобщения влияет отношение числа обучающих примеров (длина выборки обучения)  $N$  к общему числу весов (связей)  $L_w$  сети, то следует правильно подбирать количество сетевых нейронов. Но на сегодняшний день отсутствуют формулы для точного определения нужного количества нейронов в сети в соответствии с заданной обучающей выборкой. Имеющиеся способы настройки количества нейронов в ходе обучения можно разбить на две группы алгоритмов: 1) алгоритмы редукции и 2) алгоритмы наращивания [27, 28].

*Метод регрессии.* Удобным способом описания динамической системы является использование математических моделей. Эти модели могут быть представлены в непрерывном времени как дифференциальное уравнение систем или в дискретном времени как система разностных уравнений [8].

Существует два пути для построения математических моделей: физическое моделирование и системы идентификации.

Наиболее распространен общий метод регрессии. Рассмотрим эту модель:

$$y = a + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_kx_{ik} + e_i \quad (i=1,2,\dots,n).$$

$$F(x) = a_1 + a_2F + a_3W + a_4T + a_5H,$$

$$F(x) = a_1 + a_2F + a_3W + a_4T + a_5H + a_6F W + a_7F T + a_8F H + a_9W T + a_{10}W H + a_{11}H T + a_{12}F^2 + a_{13}W^2 + a_{14}T^2 + a_{15}H^2.$$

Модели регрессии имеют хорошие возможности для отображения отношения между эффектами приложенных нагрузок и перемещений моста.

### 4.3 Выводы

В четвертом разделе проанализированы вопросы математического и алгоритмического обеспечения мониторинга с использованием ГНСС-технологий. Мониторинг обязательным образом предполагает создание прогнозных моделей. Для этого необходима серьезная математическая основа, рассмотрение некоторого множества моделей-претендентов, критериев выбора одной из моделей, наиболее адекватной результатам наблюдений.

Выполнен анализ некоторых математических методов создания прогнозных моделей, сфера их применимости. Это традиционный метод наименьших квадратов с возможностью включения в состав различных опорных функций – степенных полиномов, экспоненциальной, логарифмической, показательной и т.д., регрессионные модели, кубические сплайны. Аналогичные результаты по методу наименьших квадратов дает фильтр Калмана.

Отдельно рассмотрен метод ИНС – информационные нейронной сети. Для данного реального объекта именно этот метод оказался наиболее применимым к прогнозированию.

Выполнена реализация алгоритма выбора прогнозных моделей, как кинематических, так и динамических, в системе программирования MATLAB.

## 5 МОНИТОРИНГ МОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС

### 5.1 Мост NanGu (сбор данных с помощью ГНСС)

Вантовые мосты являются важным и широко используемым элементом региональной и городской инфраструктуры для различных перевозок и повседневного транспортного движения. Одной из составляющей системы для обеспечения их безопасности является геодезическое мониторинговое наблюдение с помощью технологий ГНСС. На изменение положения характерных конструктивных элементов моста значительно влияют транспортная нагрузка, температура и ветер, что затрудняет задачу построения прогнозной модели. В данном разделе приведен анализ выше указанных влияний на динамику подвесного моста с использованием реальных экспериментальных данных ГНСС. При проведении вычислительных экспериментов сравнивались методы аппроксимации степенными полиномами, сплайнами и информационной нейронной сетью (ИНС).

NanGu-мост – один из вантовых мостов в Китае – был построен в декабре 1987 года, закрыт для эксплуатации в октябре 2006 года, потому что трещины были более чем на половину пролета, и заново открыт в августе 2007 года [82]. Весь мост имеет четыре полосы движения общей протяженностью 510,00 м, а главный пролет моста – длиной 260,00 м. Для обеспечения безопасности сложных долгосрочных систем был разработан и продолжается реализовываться проект научно-исследовательского центра мониторинга совместно с Харбинским технологическим институтом для контроля нагрузки и реакции мостов [109].

Чтобы определить текущую эксплуатационную безопасность и причину трещин конструкций моста, его движения были отслежены в различных ситуациях, таких, как скорость ветра, изменения температуры и нагрузки движения транспорта [13, 19]. В наблюдаемых X и Y направлениях пилоны моста были обработаны и смоделированы в соответствии с современными методами идентификации.

Было выполнено обеспечение непрерывного отображения кинематического поведения моста при некоторых нагрузках. Опрос ГНСС-наблюдений выполнялся с частотой дискретизации данных 20 Гц, угол отсечки приемника был задан  $13^\circ$ , и в сфере наблюдений было как минимум девять спутников. Использовались три ГНСС-приемника: два – в верхней части пилонов (рисунок 26), а третий использовался в качестве опорной станции на твердом грунте возле моста. Цифры 2002 и 2001 обозначают северный пилон (N.Tower) и южный пилон (S.Tower) соответственно. Позиционирование приемников было привязано к WGS84.

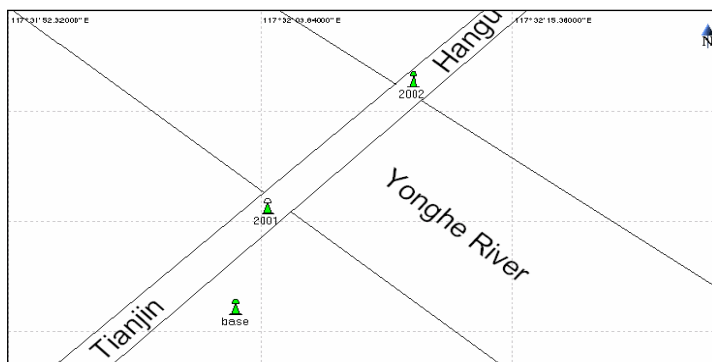


Рисунок 26 – Геометрия и расположение на мосту приемников ГНСС

ГНСС-наблюдения выполнялись в режиме реального времени кинематической RTK. Приемники LEICA GMX902 – с антенной на станциях наблюдения. Два подвижных приемника были закреплены на пилонах моста. Каждый приемник на станции вел наблюдения 24 ч в сутки. Скорость сбора данных составляла 72000/час. Каждая эпоха обязательно корректировалась с базовой станции [82, 103].

Средняя минимальная температура в месте расположения моста является минус  $3^\circ\text{C}$  в декабре и январе, в то время как средняя максимальная температура в августе  $+25^\circ\text{C}$ . Минимальная температура была минус  $13^\circ\text{C}$  в январе и максимальная температура  $+30^\circ\text{C}$  в августе.

Различия наблюдений в разное время также можно получить по среднему значению этих наблюдений, как показано в таблице 22 и 23.

Таблица 22 – Температура, влияющая на отклонение пилона и балки жесткости

Свойство	Значение
Коэффициент термического расширения, $\alpha$	$12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Максимальная температура	$30 ^\circ\text{C}$
Минимальная температура	$-13 ^\circ\text{C}$
Высота пилона, Н	62,50 м
Длина пролета, L	260,00 м
Отклонение в пилоне, $\delta_b$	0,0323 м
Отклонение в пролете, $\delta_{\text{п}}$	0,1342 м

Таблица 23 – Средние значения наблюдений и прогноз

Дата	Апрель -2008 (прогноз)			Июнь -2008 (прогноз)	
d X1 среднее, см	5,37			-0,87	
d Y1 среднее, см	4,79			0,11	
d X2 среднее, см	-0,18			1,83	
d Y2 среднее, см	-2,93			-1,24	
Дата	Июнь 2007	Август 2007	Октябрь 2007	Январь 2008	Февраль 2008
d X1 среднее, см	0,29	-0,23	2,44	8,30	8,82
d Y1 среднее, см	-0,14	0,51	1,54	5,99	5,92
d X2 среднее, см	0,39	1,71	-0,68	-0,91	-0,71
d Y2 среднее, см	0,46	-1,28	-0,88	-0,99	-1,43

Было рассмотрено несколько вариантов моделирования смещений мостовых пилонов, полученных из ГНСС-наблюдений. Далее выполнялась оценка аппроксимирующих моделей. Для степенных полиномов выбор делался по минимуму суммы квадратов отклонений прогнозных значений смещений от реальных смещений. Построение моделей (обучение) выполнялось по пяти временным узлам, а

прогноз по полученным моделям делался для последующих шестого и седьмого временного узла (рисунки 27 и 28 и таблица 24).

Таблица 24 – Характеристики временных моделей с различными математическими опорными функциями, полученные по результатам геодезических наблюдений

Степень полинома	Уравнение	$R^2$
Северный пилон (N.Tower)		
1 Степень	$x = 1,2401t - 13,685$	0,909
2 Степень	$x = 0,15146t^2 - 3,0345t + 15,117$	0,970
3 Степень	$x = -0,056033 t^3 + 2,4784t^2 - 34,48t + 153,31$	0,998
4 Степень	$x = -0,00513 t^4 + 0,2326t^3 - 3,521t^2 + 20,088t - 29,738$	1,000
1 Степень	$y = 0,858t - 9,416$	0,931
2 Степень	$y = 0,0767t^2 - 1,307t + 5,168$	0,965
3 Степень	$y = -0,0272t^3 + 1,206 t^2 - 16,567t + 72,236$	0,979
4 Степень	$y = -0,01473 t^4 + 0,80184t^3 - 16,029t^2 + 140,18 t - 453,61$	1,000
Южный пилон (S.Tower)		
1 Степень	$x = -0,2346t + 3,2913$	0,507
2 Степень	$x = -0,01152t^2 + 0,09049t + 1,1009$	0,512
3 Степень	$x = 0,0477t^3 - 1,9905t^2 + 26,832t - 116,43$	0,836
4 Степень	$x = -0,0155t^4 + 0,9194t^3 - 20,113t^2 + 191,66t - 669,35$	1,000
1 Степень	$y = -0,1595t + 1,441$	0,583
2 Степень	$y = 0,04523t^2 - 1,436t + 10,042$	0,749
3 Степень	$y = -0,03027t^3 + 1,3023t^2 - 18,423t + 84,699$	0,983
4 Степень	$y = 0,00451t^4 - 0,2839t^3 + 6,5744t^2 - 66,373t + 245,55$	1,000

Наиболее адекватным описанием кинематики пилонов моста степенными полиномами были установлены полиномы 3-й степени для смещений  $x$  и  $y$  пилона №1, а для смещений  $x$  и  $y$  пилона №2 – полиномы 2-й степени. С использованием

тех же данных были получены аппроксимационные модели на основе кубических сплайнов.

Было установлено, что различия между значениями наблюдений и прогнозирования оказались высоки. Это подтверждает зависимость достоверности прогноза не только от времени, но и от транспортной нагрузки и ветра.

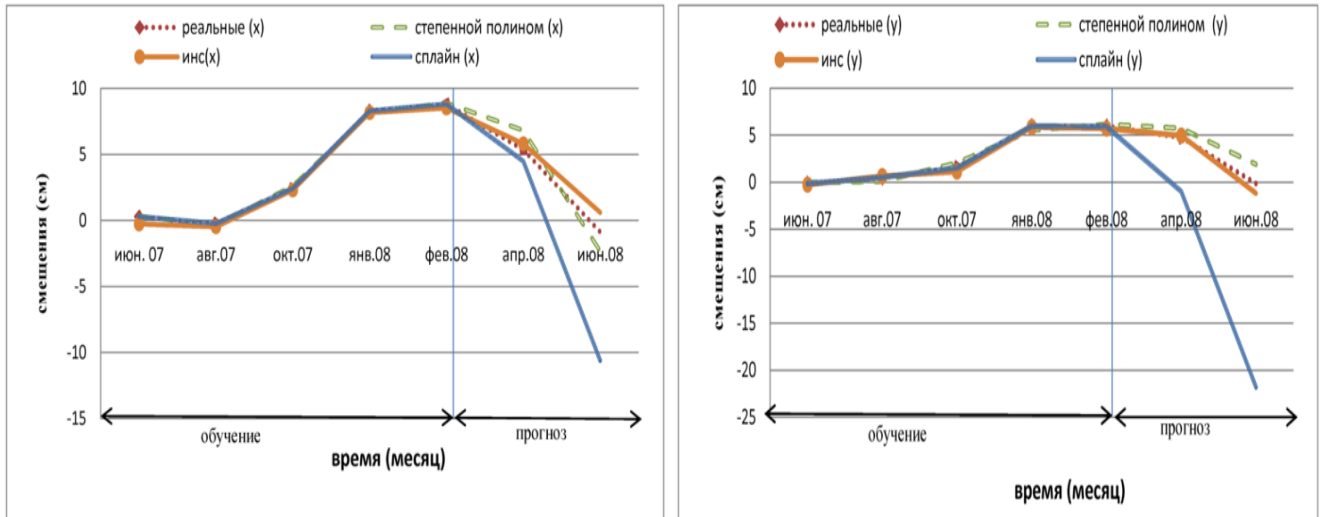


Рисунок 27 – Смещения  $x$  и  $y$  для пилона №1

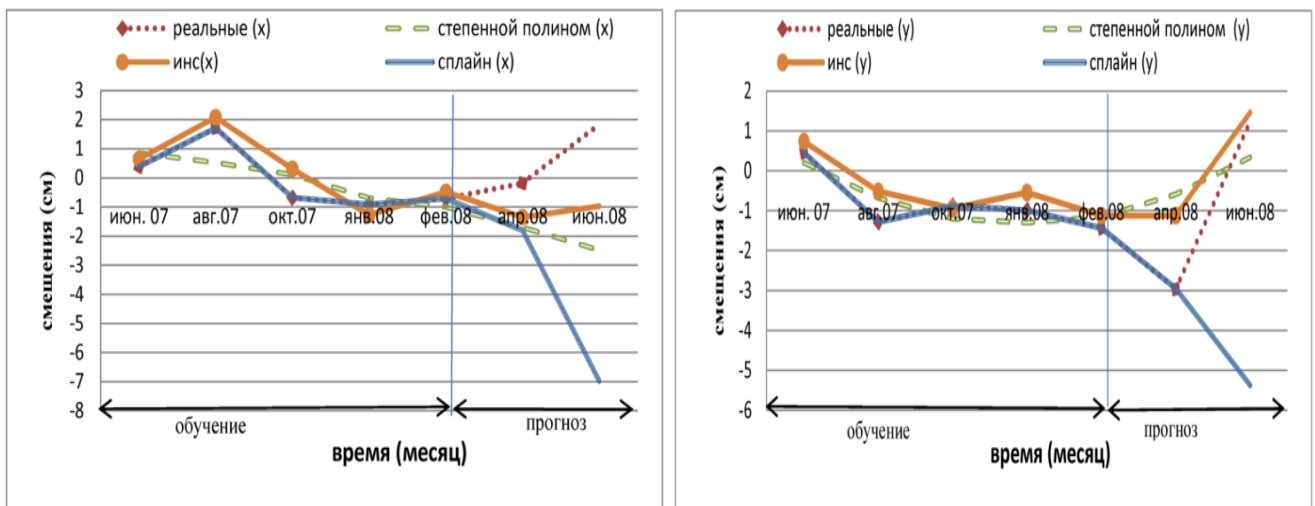


Рисунок 28 – Смещения  $x$  и  $y$  для пилона №2

Достаточно убедительные результаты для целей прогноза смещений подвесного моста в условиях воздействия на него внешних сил были получены при использовании нейронных сетей. Различия между реальными и прогнозными значениями смещений не превысили 3 см. Наглядно показывают результаты сравне-

ния прогнозных качеств степенных полиномов, кубических сплайнов и нейронных сетей рисунки 27 и 28.

Чувствительность ГНСС-определений может быть достаточно высокой в приложении к мониторингу движений и деформаций конструкций. Безусловно, первостепенным является математическое моделирование пространственно-временного поведения исследуемого объекта. Главным результатом является возможность предсказания (времени, места, силы воздействия). В данном аспекте описанные выше геодезические методы, использующие ДГНСС-RTK, могут предоставить ценные данные оценки состояния деформационных конструктивных элементов. Реальные данные наблюдений говорят, что южный пилон вернулся в исходное положение спустя десять месяцев. Отметим, что прогнозируемые значения зависят не только от времени, но и от влияния транспортного движения и ветра.

## 5.2 Мост Хуанпу

*Смещения пролетной части моста.* Мост Хуанпу был открыт в 2008 году. Он был в то время третьим самым длинным подвесным мостом в Китае. Мост имеет общую длину 2,27 км.

На южном берегу реки Хуанпу мост является обычным двухпилонным подвесным мостом. Основной пролет 1108 м подвешен на опоры из двух основных кабелей, в то время как боковые пролеты поддерживаются внизу колоннами [14].

На северном берегу реки мост Хуанпу является обычным однопилонным вантовым мостом с главным пролетом 383 м. Противоположная сторона около подвесного моста имеет длину 197 м.

Пилоны обоих мостов сделаны из бетона. Высота главного пилона вантового моста составляет 201 м, в то время как высота двух пилонов подвесного моста 189 м. Проезжая часть мостов состоит из обтекаемой стальной балки коробчатой конструкции, высота которой составляет 3,5 м, общая ширина 41,7 м.

Сбор данных положения моста в критических точках проводился непрерывно в течение почти 24 ч с 09 ч утра 24 сентября 2009 года до 09 ч утра 25 сентября 2009 года. За весь данный период на мосту располагались 13 ГНСС-приемников, и одна базовая станция была на берегу, как показано на рисунке 29 [14]. ГНСС-приемники собирали информацию со скоростью передачи данных от 10 Гц и выше. В дополнение выполнялись метеорологические измерения рядом с приемником ГНСС западной стороны. Выполнялись измерения температуры воздуха, давления, относительной влажности, скорости и направления ветра каждые 15 с.

Данные ГНСС записывались в текст файла. Файлы были получены соответственно от приемников станций и базовой станции. Они содержали относительные изменения смещения (мм) для своей точки. Данные  $X$  имеют изменения относительного смещения в продольном направлении моста, данные  $Y$  представляют собой относительные изменения смещения в горизонтальном (поперечном) направлении моста, и данные  $Z$  представляют изменения относительного смещения моста по высоте.

Расстояние между базовой станцией и точкой 107 составляет 1,00 км и 1,50 км от точки 101 на рисунке 29.

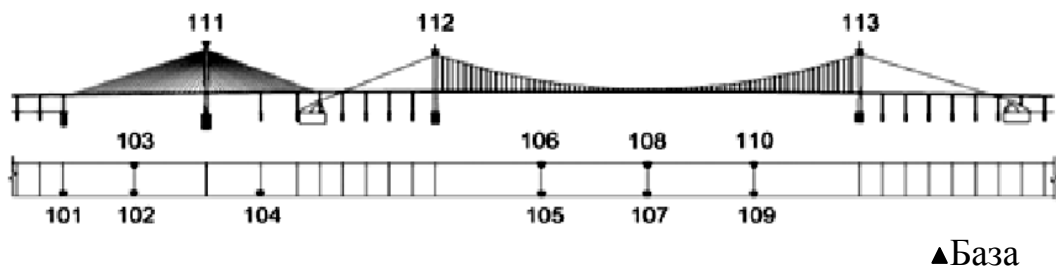


Рисунок 29 – Нумерация ГНСС критических точек моста

Рисунки 30 и 31 иллюстрируют высоту смещения за весь 24-часовой период для точек 107 и 108 в середине подвесного моста.

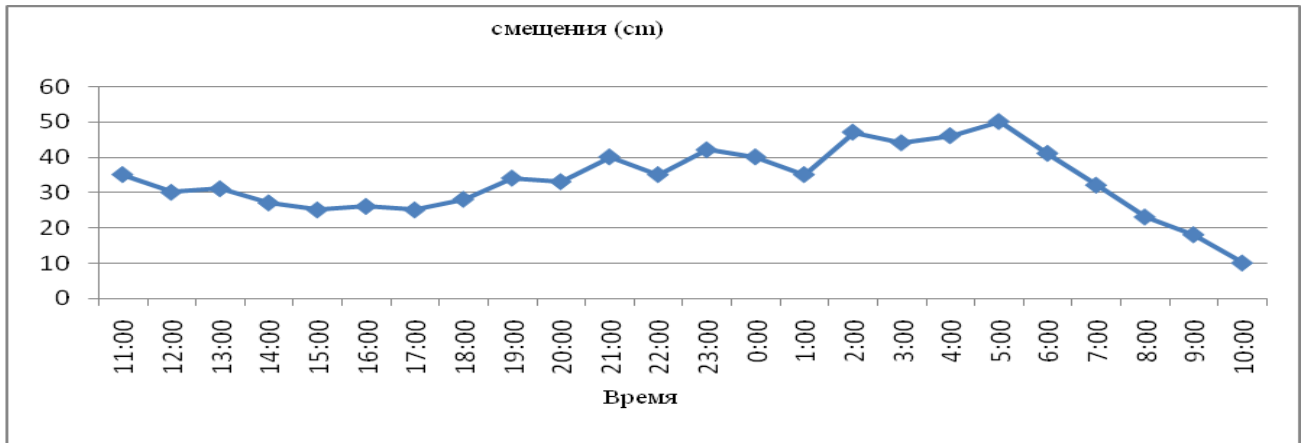


Рисунок 30 – Вертикальные смещения точка 108 моста за 24 ч наблюдений

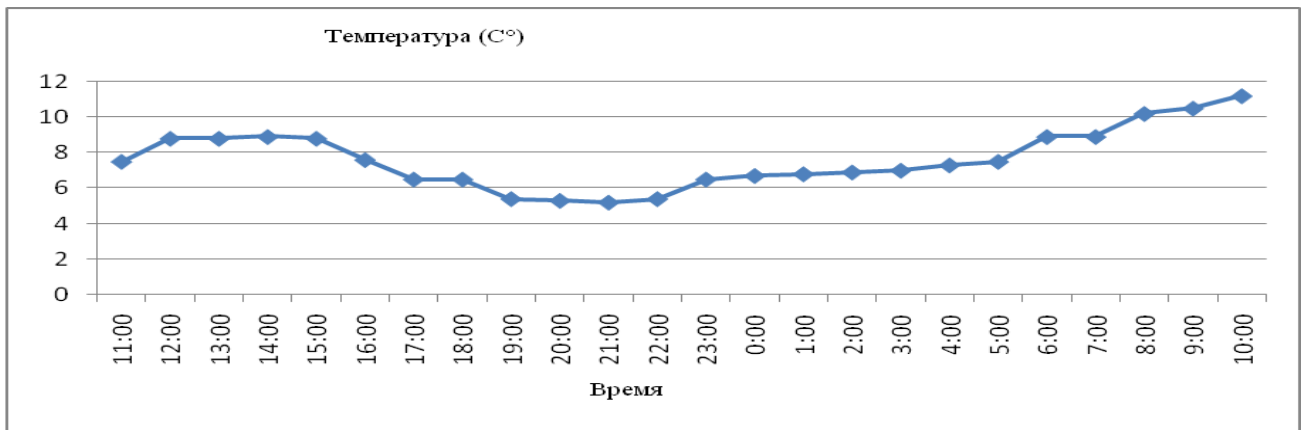


Рисунок 31 – Изменения температуры в течение 24 ч наблюдений

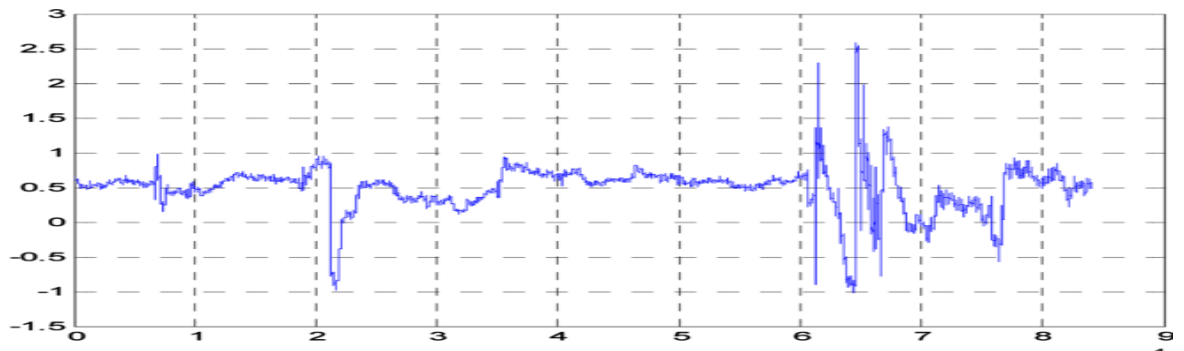
Из этого анализа видно, что движение по мосту вызывает смещение около дециметра. Рисунки 30 и 31 иллюстрируют зависимость между температурой воздуха и высотой отклонений в точке 108, изменениями температуры и длиной тросов и, как следствие, вертикальным положением пролета моста. Рисунок 31 показывает отношение при изменении температуры примерно на 6 °С. На самом деле в течение года амплитуда колебаний температуры воздуха в этом месте может составить около 25 °С, поэтому можно ожидать более значительных вертикальных смещений.

*Продольный наклон моста (расчет по вертикальным смещениям).* Угловые характеристики продольного наклона по результатам мониторинга вычислялись по следующей формуле.

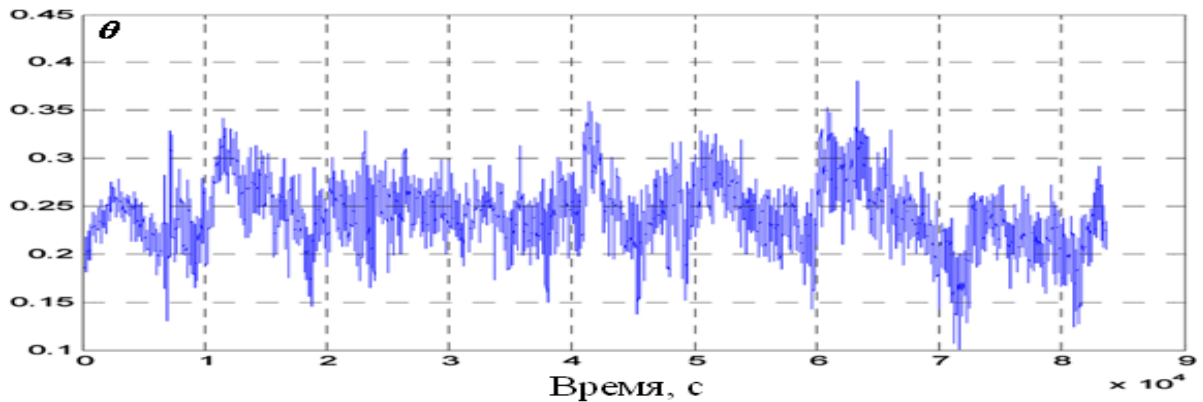
$$\theta = \arcsin\left(\frac{Z - \bar{Z}}{B}\right),$$

где  $Z$  и  $\bar{Z}$  – вертикальные смещения в симметричных участках, а  $B$  – расстояние между двумя станциями 34,5 м.

Рисунок 32 иллюстрирует продольный наклон, который был определен по данным из точек 102 и 103 для первого пролета моста и точек 107 и 108 – для второго пролета. Смещение измеряли для определения поведения моста под влиянием ветра и транспортного движения.



а)



б)

Рисунок 32 – Смещение моста (в градусах) в зависимости от нагрузок:

а) пролет 1; б) пролет 2

На рисунке 32 можно увидеть, что диапазон изменения угла продольного наклона для пролетов 1 и 2 составляет  $0,25^\circ$  и  $3,5^\circ$ , а также среднее значение со-

ставляет  $0,25^\circ$  и  $0,50^\circ$ . Они указывают на то, что длина пролета зависит от значений изменения угла продольного наклона.

Примечание – результаты для рисунка 32 приведены из приложения Г.

### 5.3 Экспериментальные исследования изменений по высоте критических точек мостов

Метод определения смещений моста в зависимости от нагрузок включает в себя далее названные операции, проведенные в указанной ниже последовательности:

- этап 1 поиск всех критических точек моста;
- этап 2 расположение в каждой критической точке приемника ГНСС;
- этап 3 подготовка автотранспортного средства массой 50 т;
- этап 4 расположение приемника ГНСС на автотранспортном средстве;
- этап 5 начало движения автотранспортного средства массой 50 т со скоростью 64 км/ч;
- этап 6 рассмотрение состояния критических точек в момент движения автотранспортного средства по мосту в реальном времени с использованием относительного метода;
- этап 7 фиксация результатов наблюдений (составление графика смещений);
- этап 8 повторение пятого, шестого и седьмого этапов эксперимента многократно для получения СКО.

В ходе эксперимента были определены отклонения по высоте с учетом влияния движения 50-тонного автомобиля. Рисунок 33 показывает высотную компоненту определений координат всеми приемниками ГНСС на пролетах моста. Отмечено, что мост отклоняется примерно на  $(15 \pm 1)$  см.

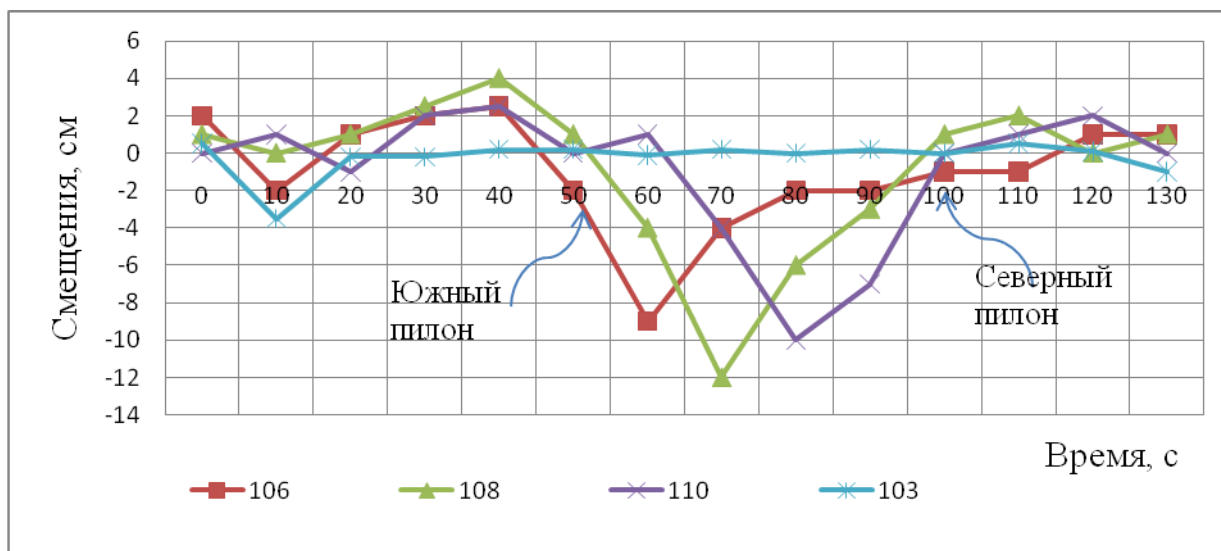
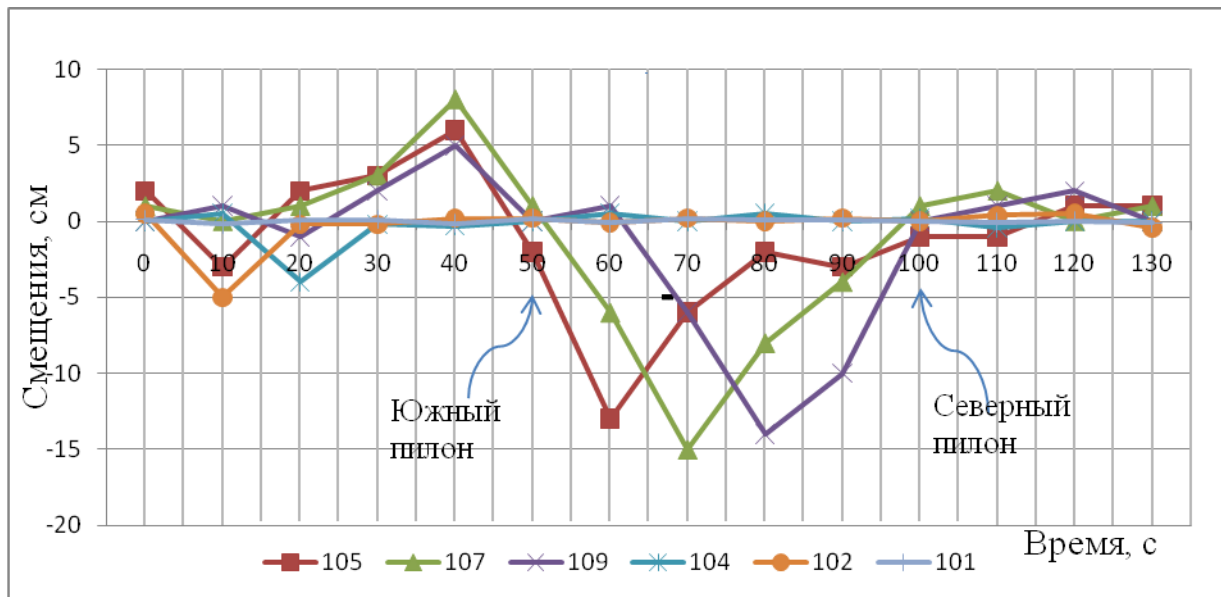


Рисунок 33 – Отклонение высоты в зависимости от времени наблюдения при 50-тонной нагрузке (автомобиля в 50 т, двигавшегося с юга на север)

Рисунок 33 показывает, что мост состоит из пяти отдельных пролётов, соединённых тросами, которые проходят над верхней частью пилонов. Когда автомобиль проходит участок на южной стороне пролета, его вес давит на этот маленький пролет вниз, что в свою очередь нагружает подвески и кабель, к которому они присоединены. Это приводит к тому, что кабель натягивается на основном пролете. Максимальные отклонения в каждой точке смещены друг от друга, что указывает на влияние нагрузки от движения транспорта на результаты измерений.

#### 5.4 Конечно-элементная модель для моста (Finite Element Model)

Конструктивно мосты в основном состоят из надстройки и подструктуры. Мостовые пролеты, кабели, подвески, главная опорная система, боковое крепление и пилон (выше мостовых пролетов) включены в надстройку, в то время как фундамент, крепления и колонны – в основание [21].

Анализ состояния этих мостов должен осуществляться для различных условий нагружения. Мосты, как правило, предназначены для стационарных грузов, временной и других случайных нагрузок. Для проведения статического и динамического анализа конструкции моста были использованы Visual Bridge System Design (VBDs) и программное обеспечение SAP2000 (модель моста в SAP2000 представлена на рисунке 34).

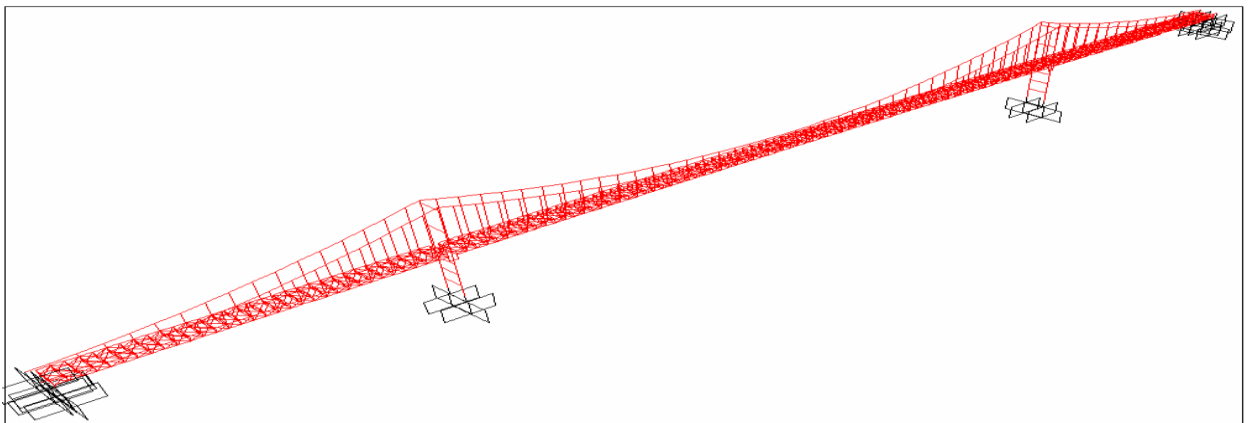


Рисунок 34 – Модель моста в SAP2000

Значение перекодируется с использованием ГНСС с учетом различных факторов (ветра, температуры, движения). Среднее отклонение модели SAP2000 составляет почти 23 см из-за собственного веса и временной нагрузки (автомобиль весом 50 т двигался со скоростью 64 км/ч). Результаты исследований показывают, что действительно целесообразно для подобных инженерных конструкций использовать ГНСС-наблюдения. В случае с мостами это позволяет, в частности, выполнять мониторинг для измерения величины и частоты прогибов моста.

Результаты анализа ГНСС-наблюдений сравнивались с результатами модели SAP (structural analysis program) 2000. Это вполне может быть основой мониторинга будущих созданных мостов, в результате чего реальные данные координатных ГНСС-определений характерных точек на мосту при использовании с математическими прогнозными моделями позволяют оценить поведение моста [25]. Если структура со временем ухудшается или если происходят какие-либо непредвиденные влияния внешней среды или техногенного происхождения, то эти действия могут быть оперативно учтены путем адаптации аппроксимационных математических моделей на основе координатных ГНСС-определений.

### 5.5 Применение метода регрессии при построении динамической модели

Удобным способом описания динамической системы является использование математических моделей. Эти модели могут быть представлены в непрерывном времени как дифференциальное уравнение систем или в дискретном времени как система разностных уравнений [25].

Существует два пути для построения математических моделей: физическое моделирование и системы идентификации.

Использовались классические формулы регрессии (10) и (11)

$$y = a + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_kx_{ik} + e_i \quad (i=1,2,\dots,n)$$

$$F(x) = a_1 + a_2F + a_3W + a_4T + a_5H \quad (10)$$

$$F(x) = a_1 + a_2F + a_3W + a_4T + a_5H + a_6FW + a_7FT + a_8FH + a_9WT + a_{10}WH + a_{11}HT + a_{12}F^2 + a_{13}W^2 + a_{14}T^2 + a_{15}H^2, \quad (11)$$

где  $F$  – нагрузка машин на мост в данный момент времени (в тоннах);

$W$  – скорость ветра, м/с;

$T$  – температура,  $С^0$ ;

$H$  – влажность, %.

Эмпирически получены математические уравнения связи смещений в см с некоторыми метеорологическими факторами (ветром, температурой, влажностью) и транспортной нагрузкой, в соответствии с формулами (10) и (11).

$$XReg_1(H, F, T, W, X) = 0,120W - 0,131T - 0,0003F - 0,021H + 3,235.$$

$$XReg_2(H, F, T, W, X) = 0,03W^2 - 0,003T^2 + 0,008H^2 + 0,00F^2 - 0,002FW - 0,005FT + 0,040TW + 0,160HW - 0,016HT + 0,001HF + 0,774W - 0,043T - 0,015F - 0,352H + 2,640.$$

### 5.6 Алгоритм программы для модели мониторинга и прогнозирования

С помощью MATLAB нами создана программа, которую можно использовать для вычисления коэффициента уравнений (рисунок 35).

Алгоритм основной программы (её данные и результаты в частности, для x-координат представлены в соответствии с приложением Ж) состоит из несколько шагов:

- первый шаг – ввод всех данных;
- второй шаг – деление данных на две группы. Первая группа составляет 2/3 от всех данных и используется для определения коэффициента уравнений. Остальная часть данных (1/3) – это вторая группа, в которой представлены данные для прогнозирования;
- третий шаг программы – рассмотрение первой группы данных и обращение к пользователю с командой поставить 1, если ему нужны кинематические уравнения, или 2 – если необходимы динамические уравнения;
- если пользователь поставил 1, это четвертый шаг программы. В этом случае запрашивается тип уравнения. Пользователь ставит 1, если он выбирает нейронную сеть, 2 – если выбор пал на многочлен, выбирается степенной полином, 3 – если выбирается экспоненциальная функция, 4 – сплайн. (При выборе нейронной сети появится запрос написать 1 – для x, 2 – для x, y, 3 – для x, y, z;

– если пользователь поставил 2, это уже пятый шаг. Здесь программа запросит пользователя поставить 1 – для нейронной сети и 2 – для регрессионного уравнения. (Если будет выбрано число 1, программа запросит указать количество координат);

– на шестом этапе программа запускается и сравниваются результаты прогнозирования, вычисленные с помощью уравнений и реальных данных двух групп (см. второй этап);

– седьмой этап программы – получение пользователем цифровых величин с минимальной ошибкой, которой можно пренебречь. Цифровые величины представляют собой указание на время и реальные данные, данные оценки.

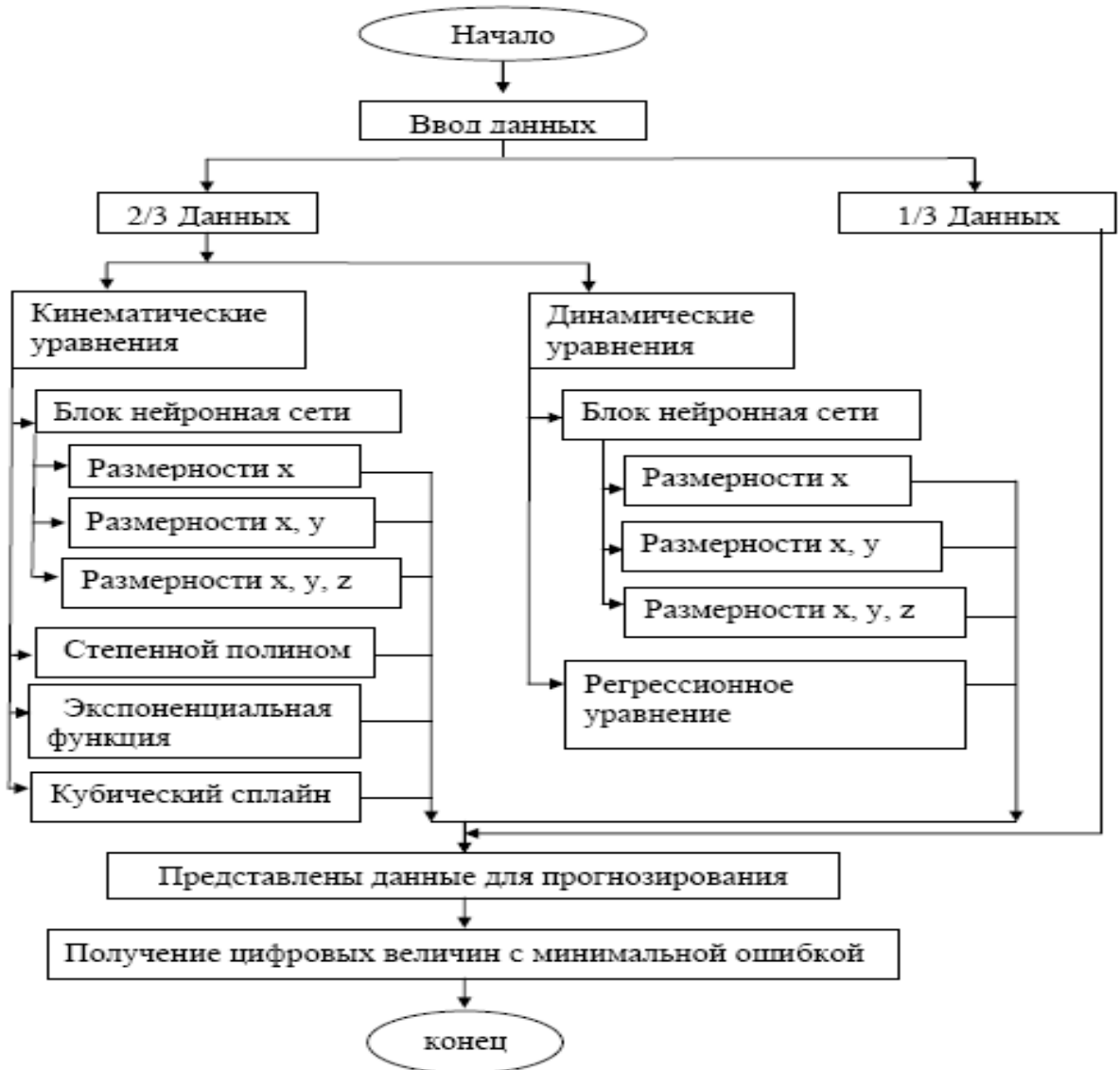


Рисунок 35 – Блок-схема алгоритма основной программы прогнозирования

Итак, в пятом разделе описано развитие вопросов улучшения качества координатных определений и возможностей использования ГНСС-технологий для крупных инженерных сооружений. Все вышеизложенное позволяет сделать ниже следующие выводы [110, 111].

### 5.7 Выводы

Реальным объектом исследований были вантовые мосты с данными геодезического мониторинга их кинематики в течение года.

Использование в качестве прогноза нейронной сети в сравнении с другими методами построения прогнозных моделей можно признать очень перспективным.

Отмечено и подтверждено результатами вычислительных экспериментов преимущество нейронных сетей не только в случае кинематики объекта, но и при динамике его составляющих. Применительно к вантовым мостам это учет нагрузки вследствие транспортного движения, температуры, влажности, ветра. Эмпирически полученные математические уравнения подтверждают эту связь смещений с некоторыми погодными факторами (ветром, температурой, влажностью). Длина пролета зависит от значений изменения продольного наклона угла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования были получены следующие результаты:

- экспериментально доказано, что для системы OmniSTAR, применяемой в странах Среднего Востока, время наблюдений уменьшается на десятки процентов; доказано возможное повышение точности ГНСС-измерений при использовании метеосенсоров;
- установлено, что при измерениях с использованием одной станции (взамен нескольких базовых) точность координирования при коротких расстояниях (до 10 км) практически не снижается;
- выполнен анализ математического обеспечения мониторинга с использованием ГНСС-технологий. Представлен анализ использования ряда математических методов для создания прогнозных моделей: метода наименьших квадратов с возможностью включения в состав различных опорных функций, регрессионных и других моделей. Эмпирически получены математические уравнения, указывающие на связь смещений с рядом погодных факторов (ветром, температурой, влажностью одновременно), которые при доверительном интервале  $\Delta = \pm 2\sigma$  при вероятности  $p = 0,95$  улучшают корреляцию до 0,81;
- показано применение метода информационной нейронной сети (ИНС), который для доверительного интервала  $\Delta = \pm 2\sigma$  при вероятности  $p = 0,95$  обеспечил корреляцию 0,96. Доказано преимущество нейронных сетей для достоверной оценки как кинематики, так и динамики наблюдаемого объекта;
- разработаны алгоритм и комплекс вычислительных программ для обоснованного выбора прогнозных моделей смещений и деформаций вантовых мостов с возможностью их оперативного сравнения с допустимыми значениями в системе программирования MATLAB;
- экспериментально доказано, что для крупных инженерных конструкций при измерениях, например, величины и частоты прогибов моста наиболее перспективны ГНСС-наблюдения, обеспечивающие получение наиболее достоверной

информации о состоянии инженерных сооружений, а, следовательно, делающие оценку их безопасности более надёжной при эксплуатации.

Рекомендуется использование ИНС-моделей, как динамических, так и кинематических, при прогнозировании деформаций не только вантовых мостов, но и всех других инженерных сооружений. В этом плане перспективны дальнейшие научные исследования по поиску других динамических регрессионных формул и последующее их развитие и использование.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Андреев, Н. К. Оценка скорости асинхронного двигателя в системах адаптивного управления по эталонной модели и с нейронной сетью [Текст] / А. З. Диаб Ахмед, С. А. Али, Н. К. Андреев // Энергетика Татарстана. – 2012. – № 2. – С. 57-61.
- 2 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]: монография в 2 т. Т. 1. / К. М. Антонович. – М.: Картогеоцентр, 2005. – 334 с.
- 3 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]: монография в 2 т. Т. 2. / К. М. Антонович. – М.: Картогеоцентр, 2006. – 360 с.
- 4 Антонович, К. М. Совместное использование метеоданных наземных и аэрологических наблюдений при обработке спутниковых измерений [Текст] / К. М. Антонович, Е. К. Фролова // Вестник СГГА. – 2003. – Вып. 8. – С. 8-13.
- 5 Антонович, К. М. Этапы развития спутниковых технологий с применением систем GPS/ГЛОНАСС [Текст] / К. М. Антонович // Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 6-10.
- 6 Большаков, В. Д. Высокоточные геодезические измерения для строительства и монтажа большого серпуховского ускорителя [Текст] / В. Д. Большаков. – М.: Недра, 1968. – 304 с.
- 7 Брайт, П. И. Геодезические методы определения деформаций и сооружений [Текст] / П. И. Брайт. – М.: Недра, 1965. – 464 с.
- 8 Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст]. М.: наука, 1969. – 576 с.
- 9 Дементьев, Ю. В. Математическое моделирование движения точек земной поверхности [Текст] / Ю. В. Дементьев // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 5. – С. 81-85.

10 Денисенко, О. В. Комплекс эталонов и средств измерений для испытаний аппаратуры потребителей космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS [Текст] / О. В. Денисенко, С. И. Донченко, Е. В. Еремин // Измерительная техника. – 2003. – № 2. – С. 25-31.

11 Жуков, Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст] / Б. Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 376 с.

12 Зарзура, Ф. Х. Исследование кодовых и фазовых дифференциальных ГНСС и систем WADGPS и OmniSTAR [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров // Геодезия и картография. – № 7. – 2013. – С. 2- 4.

13 Зарзура, Ф. Х. Мониторинг мостов с использованием ГНСС [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: сб. Междунар. науч. конгр. в 2 т. - Новосибирск: СГГА, 2014. –Т. 1. – С. 175-180.

14 Зарзура, Ф. Х. Динамика мостов по результатам геодезического мониторинга с использованием ГНСС-технологий в условиях влияния ветра и транспортного движения [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: сб. Междунар. науч. конгр. в 2 т. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 1. – С. 181-185.

15 Зарзура, Ф. Х. Влияние количества базовых станций на точность ГНСС-измерений [Текст] / Г. Г. Асташенков, Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2013. – № 4/С. 1. – С. 62-63.

16 Зарзура, Ф. Х. Оценка кодовых и фазовых решений ГНСС [Текст] / Б.Т. Мазуров, Л. К. Трубина, Ф. Х. Зарзура // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2013. – № 4/С. 1. – С. 64-65.

17 Зарзура, Ф. Х. Повышение точности дифференциальной GPS и кинематики реального времени для GPS-сетей [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров // Интерэкспо Гео-Сиб–2013: сб. материалов в 3 т.– Новосибирск: СГГА, 2013. – Т.1.– С. 200-205.

18 Зарзура, Ф. Х., Алгоритм определения прогнозной модели динамики вантовых мостов по данным ГНСС-мониторинга [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров, С.Х. Ахмед // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. –С. 174-178.

19 Зарзура, Ф. Х., Аналитический метод для улучшения коэффициентов корреляции между результатами наблюдений [Текст] / Ф. Х. Зарзура, Б. Т. Мазуров, С.Х. Ахмед // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. –С. 179-182.

20 Ивахненко, А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным [Текст] / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.

21 Кафтан, В. И. Возможность и необходимость применения глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений [Текст] / В. И. Кафтан, А. В. Устинов // Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем: тез. Междунар. научно-практ. конф.– Казань, 2012. – С. 25-26.

22 Кирсанов, Н. М. Поправочные коэффициенты и формулы для расчета висячих мостов с учетом прогибов [Текст] / Н. М. Кирсанов –М.: Автотрансиздат, 1956. – 32 с.

23 Ключин, Е. Б. Практикум по прикладной геодезии: геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации инженерных сооружений [Текст] / Д. Ш. Михелев, Д. П. Барков. – М.: Недра, 1993. – 275 с.

24 Комиссаров, А. В. Методика исследования метрических характеристик сканов [Текст] / А. В. Комиссаров. – Новосибирск, 2007. – 201с.

25 Крамаренко, А. А. Математическое обеспечение идентификации движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям [Текст] / А. А. Крамаренко, Б. Т. Мазуров, В. К. Панкрушин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2005. – № 5. – С. 3-13.

26 Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинимических систем [Текст] : монография / В. А. Середович, В. К. Панкрушин, Ю. Й. Кузнецов, Б. Т. Мазуров, В. Ф. Ловягин; под общ. ред. В. К. Панкрушина. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 356 с.

27 Мазуров, Б. Т. Вычислительный эксперимент идентификации движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям [Текст] / А. А. Крамаренко, Б. Т. Мазуров, В. К. Панкрушин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2005. – № 6. – С. 3-14.

28 Мазуров, Б. Т. Идентификация напряженно-деформированного состояния вулканической области по результатам геодезических и геофизических наблюдений [Текст] / Б. Т. Мазуров // Известия вузов. Горный журнал.– 2007. – № 7. – С. 58-62.

29 Михелев, Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений [Текст] / Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов. – М.: Недра, 1977. – 152 с.

30 Невдяев, Л. Космический радиомаяк России [Электронный ресурс] Ч. 2. Навигационные устройства потребителей / Л. Невдяев.- Режим доступа: [http://www.osp.ru/nets/2000/01/102\\_print.htm](http://www.osp.ru/nets/2000/01/102_print.htm)

31 Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS [Текст] / К. Одуан, Б. Гино. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.

32 П53-90 Рекомендации по прогнозированию деформаций сооружений гидроузлов на основе результатов геодезических наблюдений [Текст] / Б. Е. Веденеева – Л.: ВНИИГ, 1991. – 35 с.

- 33 Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / М. Е. Пискунов. – М.: Недра, 1980. – 260 с.
- 34 Постнов, А. В. Основы геодезического обеспечения археологических исследований с применением спутниковых навигационных приемников [Текст] / А. В. Постнов, Е. Г. Вергунов. – Новосибирск: Свет, 2003. – 160 с.
- 35 Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений [Текст]. – М.: Стройиздат, 1975. – 142 с.
- 36 Середович, А. В. Методика создания цифровых моделей объектов нефтегазовых промыслов средствами наземного лазерного сканирования [Текст] / А. В. Середович. – Новосибирск, 2007. – 165 с.
- 37 СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы. – Изд. Офиц. – М., 1984. – 347 с.
- 38 Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации [Текст] / Ю. А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 267 с.
- 39 Татевян, С. К. Использование спутниковых позиционных систем для геодинимических исследований [Текст] / С. К. Татевян, С. П. Кузин, С. П. Ораевская // Геодезия и картография. – 2004. – № 6. – С. 33-44.
- 40 Хиллер, Б. Автоматизированный деформационный мониторинг – инновационные технологии на службу обеспечения безопасности в горнодобывающей, нефтяной и газовой промышленности [Текст] / Б. Хиллер // Маркшейдерский вестник. – № 4. – 2010 – С.1-5.
- 41 Хорошилов, В. С. Деформационный мониторинг объектов недвижимости для целей кадастрового учета [Текст] / В. С. Хорошилов, М. Ф. Носков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка – 2012. – № 2/1. – С. 30-33.
- 42 Чмых, М. К. Расширение функциональных возможностей глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на основе фазовых методов [Текст] / М. К. Чмых // Спутниковые системы связи и навигации: тр. междунар. научно-техн. конф., Красноярск, 30 сент. – 3 окт. 1997 г. – Красноярск: КГТУ, 1997. – Т.1. – С. 92-99.

43 Шануров, Г. А. Геотроника. Наземные спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ [Текст] / Г. А. Шануров, С. Р. Мельников. – М.: МИИГАиК; УПП «Репрография», 2001. – 136 с.

44 Шевченко, Е. Н. Наземная лазерная сканирующая система RIEGL LMS-Z420i новейший метод дистанционного зондирования [Текст] / Е. Н. Шевченко, В. Ф. Кучук, Н. А. Дуброва // Науков1 пращ УкрНДМ НАН України, 2008. – № 2. – С. 125-131.

45 Abozeid, H. M, Fayed, M. N, Mourad, S. M, Khalil, A. H. Cable-Stayed Bridge Model Update Using Dynamic Measurements [Text] / International conference on bridge management systems\_ monitoring assessment and rehabilitation 21-23 March 2006 Cairo, Egypt. 1-13 p.

46 Akyilmaz, O, Çelik, R. N., Apaydin, N. b, Ayan, T. GPS Monitoring Of The Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge by Using Assessment Methods Of Neural Networks [Text] / The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX Istanbul, Turkey. 6 p.

47 Allan, A. L. The Principles of Theodolite Intersection Systems [Text] –1988.– Vol. II – P. 226-234.

48 Alves, P. Development of two novel carrier phase-based methods for multiple Reference station positioning [Text] / PhD Thesis, UCGE Reports Number 20203, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada.– 2004.– 223 p.

49 Alves, P., Lachapelle, G., Cannon, M. E. In-Receiver Multiple Reference Station RTK Solution [Text] / CD-ROM Proceedings of ION GPS/GNSS 04, Institute of Navigation, Long Beach, California, USA, F6. –2004.–9 p.

50 Ashraf, A. Beshr. Accurate surveying measurements for smart structural members [Text] / Ashraf A. Beshr// M.Sc. Thesis. – Mansoura University. – Mansoura. – Egypt, 2004. – 194 pp.

51 Ashraf A. Beshr Development and Innovation of Technologies for Deformation Monitoring of Engineering Structures Using Highly Accurate Modern Surveying

Techniques and Instruments [Text], Ph.D. thesis, Siberian State Academy of geodesy SSGA, Novosibirsk, Russia, 2010.–205 p.

52 Botton, S. GPS localisation et navigation [Text] / S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels et al. - Paris: Hermès, Франц.1997. –160 p.

53 Cannon, M. E. Characterization of GPS carrier phase Multipath and Mitigation through the use of Multiple Antennas [Text], IMA Conference/August16-18, 2000. Canada. 2000. – P. 343-352.

54 Dai L., Han S., Wang J., Rizos C. Comparison of Interpolation Algorithms in Network-Based GPS Techniques, Navigation Department of Geomatics Engineering [Text], The University of Calgary, Canada. –2002.– P. 277-293.

55 Diep, Dao. Location-based services: technical and business issues [Text] /Diep Dao, C. Rizos, J. Wang // GPS Solutions, Vol. 6, No. 3. – 2002. – P. 169-178.

56 Diep Dao April (2005) “Performance Evaluation of Multiple Reference Station GPS RTK for a Medium Scale Network” [Text] / Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Canada. – 2005.– P. 173-182.

57 Ehigiator – Irughe, R. (2004) “Environmental safety and monitoring of crude oil storage tank at the Forcados terminal” [Text] / M.Eng Thesis, Department of Civil Engineering, University of Benin, Benin City, Nigeria.

58 Elghazoly,A. Accuracy Aspects of Static GPS With Special Regard to Internet- Aided Techniques [Text] / Faculty of engineering ,Alexandria. Egypt. 138 P.

59 El-Rabbany, A. Introduction to GPS: The Global Positioning System [Text] / A. El-Rabbany. – Boston, London: Artech House. – 2002. – 176 p.

60 Emily COSSER, Gethin W ROBERTS, Xiaolin MENG and Alan H DODSON, Single Frequency GPS for Bridge Deflection Monitoring: Progress and Results [Text] // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004 United Kingdom. p. 1-13.

61 Frohlich, C. Terrestrial laser scanning — new perspectives in 3d surveying [Text] C. Frohlich, M. Mettenleiter // International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Vol. XXXVI- 8/W2, 2005. – P. 7-13.

62 Gairns, C. Development of semi-automated system for structural deformation monitoring using reflectorless total station [Text] M. Sc thesis, Department of Geodesy and Geomatics engineering , University of New Brunswick, Canada. 2008.– Pp188.

63 Georgopolis, G. D., Telioni E. C. Estimation of the Vertical deformation of the Stylobate of ancient temple – the case of thescion [Text] FIG symposium on Deformation Measurement and Analysis and 4th IAG symposium on Geodesy in Geotechnical and Structural Engineering LNEC Lisbon Portugal 12 -15 May 2008.

64 Gordon, S. G. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners [Text] / D. Lichti, J. Franke, M. P. Stewart // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. 14 PP.

65 GPS Manual // Global Navigation Satellite System surveying" [Text] / US Army, Department. USA. 2003.–234 P.

66 Haykin, S. Kalman filtering and neural networks [Text] / John Wiley & Sons, Communication Research Laboratory, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.-2001. – 202 P.

67 Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theory and practice. – Fifth, revised edition [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins – Wienn, New-York: Springer. – 2001. – 384 P.

68 Hopfield, H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data [Text] / H.S. Hopfield // J. of Geophysical Research, Vol. 74, No 18, August 20, 1969. – P. 4487-4499.

69 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gfk-leica.ru/monit/why.htm>.

70 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.icentre-gfk.ru/data/def\\_mon\\_bridges\\_ru.pdf](http://www.icentre-gfk.ru/data/def_mon_bridges_ru.pdf)

71 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://myref.ru/preview/74876.html>

72 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intergeo.ru/index.php?rid=5&id=4>

73 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.icentre-gfk.ru/article/a\\_def\\_mon\\_bridges.htm](http://www.icentre-gfk.ru/article/a_def_mon_bridges.htm)

74 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mb-spb.com/?page=articles&list=5>

75 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.navgeocom.ru/catalog/tahom/index.htm>

76 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.navgeocom.ru/projects/monitor\\_gps/](http://www.navgeocom.ru/projects/monitor_gps/)

77 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.navgeocom.ru/projects/height\\_of\\_precision/index.htm](http://www.navgeocom.ru/projects/height_of_precision/index.htm).

78 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://superomsk.ru/news/13378>.

79 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.novosibtoday.ru/index.php/mosty-novosibirska/68-bugrinskij-most>.

80 HyperText Transfer Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://all-about-egypt.ru/poleznaya-informaciya/transporti/448-most-cherez-sueckij-kanal/>

81 Jihong .Z, (1999) "Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network" [Text] / Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada. 185 P.

82 Kaloop, M. R. H. Li, Monitoring of bridges deformation using GPS technique [Text] / KSCE J. Civ. Eng. (KSCE) 13 (2009) 6:423–6:431.

83 Kaplan, D., Hegarty, J. Understanding GPS Principles and Applications [Text] / Second Edition, Artech House, Inc., UK. 2006.–723 P.

84 Kouba, J. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS / J. Kouba [Text] // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2003. – V. 47, No. 4. – P. 741 – 755.

85 Lachapelle, G. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research [Text] / G. Lachapelle, P. Alves // *J. of Global Positioning Systems*. – 2002. – Vol. 1, No. 2. P. 133-136.

86 Liao, X. Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over A Regional Area GPS Network [Text], Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada. 2000.–131 P.

87 Lutes, J. A. Automated dam displacement monitoring using a robotic total station [Text] / James A. Lutes // M. Sc. Thesis Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada, 2002. – 141 pp.

88 Martin, H. Matlab Recipes for Earth Sciences [Text] / second ed., Springer, Berlin Heidelberg, New York, 2007. 279 P.

89 Meng, X. Real-time deformation monitoring of bridges using GPS [Text] // *Accelerometers*, PhD Thesis, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, the Nottingham University, UK. 2002.– 258 P.

90 Moustafa A. Baraka and Adel H. El-Shazly, Monitoring Bridge Deformations during Static Loading Tests Using GPS [Text] / FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt April 16-21, 2005 Egypt TS43. 4 10 p.

91 Ogaja, C. A. framework in support of structural monitoring by real time kinematic GPS and multi-sensor data [Text] / C. A. Ogaja // Ph.D. thesis. -University of New South Wales. Sydney - Australia, 2002. – 190 pp.

92 Powermax, M. Csi Wireless Reference Manual [Text] / Canada, 2004.–74 P.

93 Principles and Practice of GPS Surveying [Text] –2006, Australia. School of Geomatic Engineering, the University of New South Wales.

94 Rabah, M. Enhancing Kinematic GPS-Ambiguity Resolution for Medium Baselines Using a Regional Ionosphere Model in Real-Time [Text] // Darmstadt university of technology Germany, 1998.– 98 P.

95 Raquet, J. F. Development of a method for kinematic GPS carrier-phase ambiguity resolution using multiple reference receivers [Text], UCGE report 20116, University of Calgary, Canada, 1998.–281 P.

96 Rizos, C. Network RTK Research and Implementation [Text] / A Geodetic Perspective , School of Surveying and Spatial Information Systems The University of New South Wales, Sydney 2052 ,AUSTRALIA, 2003.– 7 P.

97 Rizos. C. Han, S. Reference Station Network Based RTK Systems [Text] / Concepts and Progress, School of Surveying and Spatial Information Systems The University of New South Wales, Sydney NSW 2052 AUSTRALIA, 2002.–10 p.

98 Rizos. C, Yan T, Omar. S, Musa . T. Implementing network-RTK: the SyDNET CORS infrastructure[Text] School of Surveying and Spatial Information Systems The University of New South Wales, Sydney . AUSTRALIA, 2003.–11 P.

99 Vanatwerp, R. L. Engineering and design: deformation monitoring and control surveying [Text] / R. L. Vanatwerp // Engineer manual. – U.S Army corps of engineering. EM 1110-1-1004. – Washington. – U.S, 1994. –141 pp.

100 Wong, K. Monitoring Hong Kong's bridges [Text] / K. Wong, K. Man, W. Chan// GPS World, Vol. 12, No. 7. 2001. – pp. 10-17.

101 Wübbena C., Bagge A., Seeber G., Volker B., Hankemmeier P. Reducing Distance Dependent Errors for Real -time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks, Proceedings of ION [Text] // GPS-96, Institute of Navigation Kansas City, Missouri, USA. – 1996. – P. 1845 - 1852.

102 Xu, Guochang. GPS Theory, algorithms and applications [Text] / Guochang Xu. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. – 2003. – 315 P.

103 Yu, M., Guo, H., Zou, C. Application of wavelet analysis to GPS deformation monitoring [Text] Proc. of IEEE/ION PLANS 2006, San Diego, California, – P. 670-676.

104 Zarzoura, F., Ehigiator R., Mazurov, B. Accuracy Improvement of GNSS and Real Time Kinematic Using Egyptian Network as a Case Study [Text] // The Inter-

national Institute for Science, Technology and Education (IISTE) 2013, Vol.4, No.12, 2013 . – P.1-9.

105 Zarzoura, F., Ehigiator R., Mazurov, B. Investigating Accuracy Enhancement of Global Navigation Satellite System [Text] / British Journal of Earth Sciences Research, Vol.1, No.1, December 2013. – P. 1-9.

106 Zarzoura, F., Mazurov, B. Improve the Accuracy of SPP and Reduce the Cost When Using Global Navigation Satellite System [текст] / FIG Congress 2014, Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia 16 – 21 June 2014, ID No7070, 11p.

107 Zarzoura, F., Ehigiator, R., Ehigiator M. O. «An Evaluation of GNSS code and phase solutions » [Text] / The International Institute for Science, Technology and Education (IISTE) 2012, Vol 11, 2012. – P. 42-50.

108 Zarzoura, F., Ehigiator, R. Comparison between Differential GNSS Code and phase solution with Wide Area Differential GPS (WADGPS) and omniSTAR Network [Text] / The International Institute for Science, Technology and Education (IISTE) 2012, Vol.2 No. 2012. – P. 8-15.

109 Zarzoura, F., Ehigiator R., Mazurov, B. Utilizing of Mathematical Frame Work in Bridge Deformation Monitoring [Text] / Asian Journal of Engineering and Technology (ISSN: 2321 – 2462) Volume 02 – Issue 04, August 2014. – P. 293-300.

110 Zarzoura, F., Mazurov, B., Ahmed, C. Geodetic monitoring cable-stayed bridges using GNSS [Text] / FIG Working Week 2015, From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World, Sofia, Bulgaria, 17–21 May 2015, ID No 7717, 10p.

111 Zarzoura, F., Mazurov, B., Ahmed, C. Deformation analysis of cable-stayed bridges using neural networks [Text] / 2nd International workshop on “Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects”, March 23-24, 2015, Stuttgart, Germany, – p. 179-182.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## ПРОГРАММНЫЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА

## КАЛМАНА (ШАГ 1)

```

clear all, clc
%%initial values
A=1; , F=1; Ql=1 , Qw=0;
%%loading the observation vector
load('data1.mat'); %load data1;
X=data1(:,1);
Y=data1(:,2);
Z=data1(:,3);
[n,m]=size(X);
%%initial state
for i=1:1
x(i)=mean(X);
y(i)=mean(Y);
z(i)=mean(Z);
Qx(i)=1;
Qy(i)=1;
Qz(i)=1;
end
%%prediction of state vector
for i=2:n
x(i)=F*x(i-1);
Qx(i)=F*Qx(i-1)*F'+Qw; %variance covariance matrix of
prediction state
Px(i)=inv(Qx(i)); %weight of prediction state
Pl(i)=inv(Ql); %weight of observation vector
K(i)=Qx(i)*A'*inv(A*Qx(i)*A'+Ql);%kalman gain value
x(i)=x(i)+K(i)*(X(i,1)-x(i)); %the filtered estimate vec-
tor
Qx(i)=(1-K(i)*A)*Qx(i)*(1-K(i)*A)'+K(i)*Ql*K(i)'; %the va-
riance covariance matrix of estimation vector
Qv(i)=Ql-(A*Qx(i)*A'); %the variance covariance matrix
of residuals
end
for i=2:n
y(i)=F*y(i-1);

```

```

Qy(i)=F*Qy(i-1)*F'+Qw;
Py(i)=inv(Qy(i));
Ply(i)=inv(Ql);
Ky(i)=Qy(i)*A'*inv(A*Qy(i)*A'+Ql);
y(i)=y(i)+Ky(i)*(Y(i,1)-y(i));
Qy(i)=(1-Ky(i)*A)*Qy(i)*(1-Ky(i)*A)'Ky(i)*Ql*Ky(i)';
Qvy(i)=Ql-(A*Qy(i)*A');
end
for i=2:n
z(i)=F*z(i-1);
Qz(i)=F*Qz(i-1)*F'+Qw;
Pz(i)=inv(Qz(i));
Plz(i)=inv(Ql); Kz(i)=Qz(i)*A'*inv(A*Qz(i)*A'+Ql);
z(i)=z(i)+Kz(i)*(Z(i,1)-z(i));
Qz(i)=(1-Kz(i)*A)*Qz(i)*(1-Kz(i)*A)'+Kz(i)*Ql*Kz(i)';
Qvz(i)=Ql-(A*Qz(i)*A');
end
t=1/20:1/20:1/20*n;
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(t,x,'or')
hold on
plot(t,X,'+b')
hold off
title('x реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана','FontSize',16)
ylabel('x, X','FontSize',16)
xlabel('Время (сек)','FontSize',16)
grid
h = legend('x','X',2);
set(h,'Interpreter','none')
subplot(3,1,2)
plot(t,y,'or')
hold on
plot(t,Y,'+b')
hold off
title('y реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана','FontSize',16)
ylabel('y, Y','FontSize',16)
xlabel('Время (сек)','FontSize',16)
grid
h = legend('y','Y',2);
set(h,'Interpreter','none')

subplot(3,1,3)

```

```

plot (t,z, 'or')
hold on
plot (t,Z, '+b')
hold off
title('z реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана', 'FontSize', 16)
ylabel('z, Z', 'FontSize', 16)
xlabel('Время (сек)', 'FontSize', 16)
grid
h = legend('z', 'Z', 2);
set(h, 'Interpreter', 'none')

```

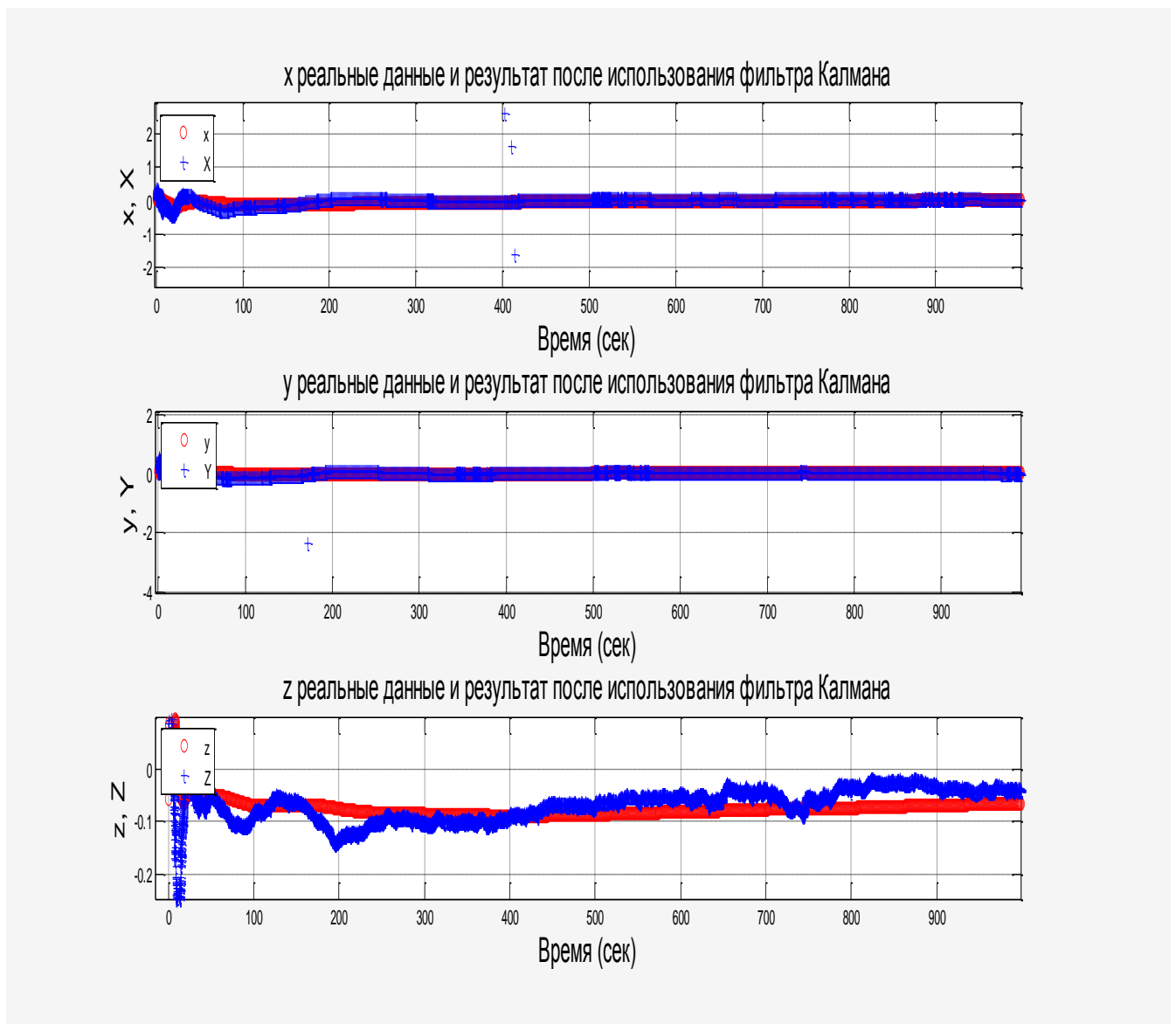


Рисунок А.1 – Реальные данные и результаты после использования в процессе прогнозирования фильтра Калмана

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

## ПРОГРАММНЫЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА

## КАЛМАНА (ШАГ 2)

```

%%initial values
A=1; , F=1; Ql=1 , Qw=10^-6;
%%loading the observation vector
load data1;
X=data1(:,1);
Y=data1(:,2);
Z=data1(:,3);
[n,m]=size(X);
%initial state
for i=1:1
x(i)=mean(X);
y(i)=mean(Y);
z(i)=mean(Z);
Qx(i)=1;
Qy(i)=1;
Qz(i)=1;
end
for i=2:n
x(i)=F*x(i-1);
Qx(i)=F*Qx(i-1)*F'+Qw;
Px(i)=inv(Qx(i));
Pl(i)=inv(Ql);          K(i)=Qx(i)*A'*inv(A*Qx(i)*A'+Ql
x(i)=x(i)+K(i)*(X(i,1)-x(i));          Qx(i)=(1-
K(i)*A)*Qx(i)*(1-K(i)*A)'+K(i)*Ql*K(i)';
Qv(i)=Ql-(A*Qx(i)*A');
end

for i=2:n
y(i)=F*y(i-1);
Qy(i)=F*Qy(i-1)*F'+Qw;
Py(i)=inv(Qy(i));
Ply(i)=inv(Ql);
Ky(i)=Qy(i)*A'*inv(A*Qy(i)*A'+Ql
y(i)=y(i)+Ky(i)*(Y(i,1)-y(i));
Qy(i)=(1-Ky(i)*A)*Qy(i)*(1-Ky(i)*A)'+Ky(i)*Ql*Ky(i)';

```

```

        Qvy(i)=Ql-(A*Qy(i)*A');
end

for i=2:n
    z(i)=F*z(i-1);
    Qz(i)=F*Qz(i-1)*F'+Qw;
    Pz(i)=inv(Qz(i));
    Plz(i)=inv(Ql);
    Kz(i)=Qz(i)*A'*inv(A*Qz(i)*A'+Ql);
z(i)=z(i)+Kz(i)*(Z(i,1)-z(i));
    Qz(i)=(1-Kz(i)*A)*Qz(i)*(1-Kz(i)*A)'+Kz(i)*Ql*Kz(i)';
    Qvz(i)=Ql-(A*Qz(i)*A');
end
t=1/20:1/20:1/20*n;

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t,x,'or')
hold on
plot(t,X,'+b')
hold off
title('x реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана','FontSize',16)
ylabel('x, X','FontSize',16)
xlabel('Время (сек)','FontSize',16)
grid
h = legend('x','X',2);
set(h,'Interpreter','none')

subplot(3,1,2)
plot(t,y,'or')
hold on
plot(t,Y,'+b')
hold off
title('y реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана','FontSize',16)
ylabel('y, Y','FontSize',16)
xlabel('Время (сек)','FontSize',16)
grid
h = legend('y','Y',2);
set(h,'Interpreter','none')

subplot(3,1,3)

```

```

plot (t,z, 'or')
hold on
plot (t,Z, '+b')
hold off
title('z реальные данные и результат после использования
фильтра Калмана', 'FontSize', 16)
ylabel('z, Z', 'FontSize', 16)
xlabel('Время (сек)', 'FontSize', 16)
grid
h = legend('z', 'Z', 2);
set(h, 'Interpreter', 'none')

```

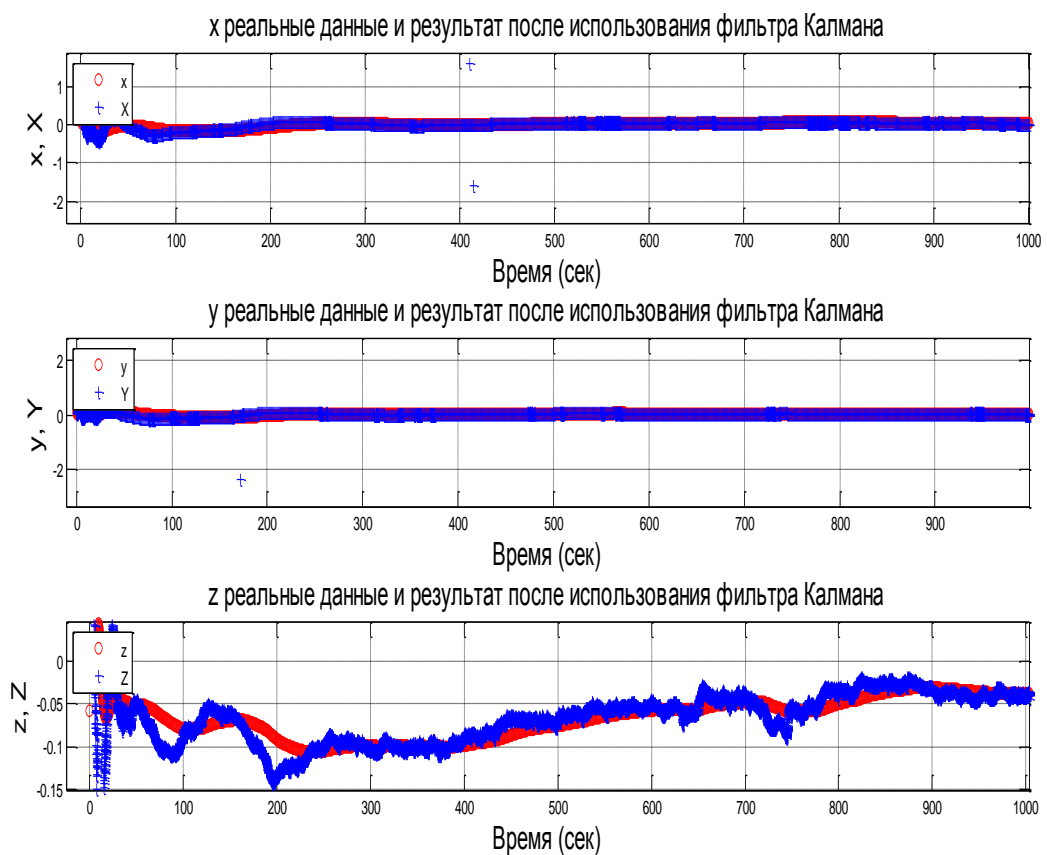


Рисунок Б.1 – Реальные данные и результаты после использования фильтра Калмана

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

## ФИЛЬТР АДАПТИВНОГО ПРОЦЕССА

```
load data1;
data=data1;
x=data(:,1);
x2=detrend(x);
y=data(:,2);
y2=detrend(y);
z=data(:,3);
z2=detrend(z);

figure (3)
plot3(x2,y2,z2)
ylabel('y','FontSize',16)
xlabel('x','FontSize',16)
zlabel('z','FontSize',16)

n=10;
wn=.99;
b=fir1(n,[.2/10 9.9/10]);
d=filter(b,1,x2);
d1=filter(b,1,y2);
d2=filter(b,1,z2);
l=kron(d,d');
mu=1/max(eig(l));
mu=1;
ha=adaptfilt.lms(10,mu);
[x1,e]=filter(ha,x2,d);
[y1,e1]=filter(ha,y2,d1);
[z1,e1]=filter(ha,z2,d2);

figure (4)
plot3(x1,y1,z1)
ylabel('y','FontSize',16)
xlabel('x','FontSize',16)
zlabel('z','FontSize',16)

[k,m]=size(x);
```

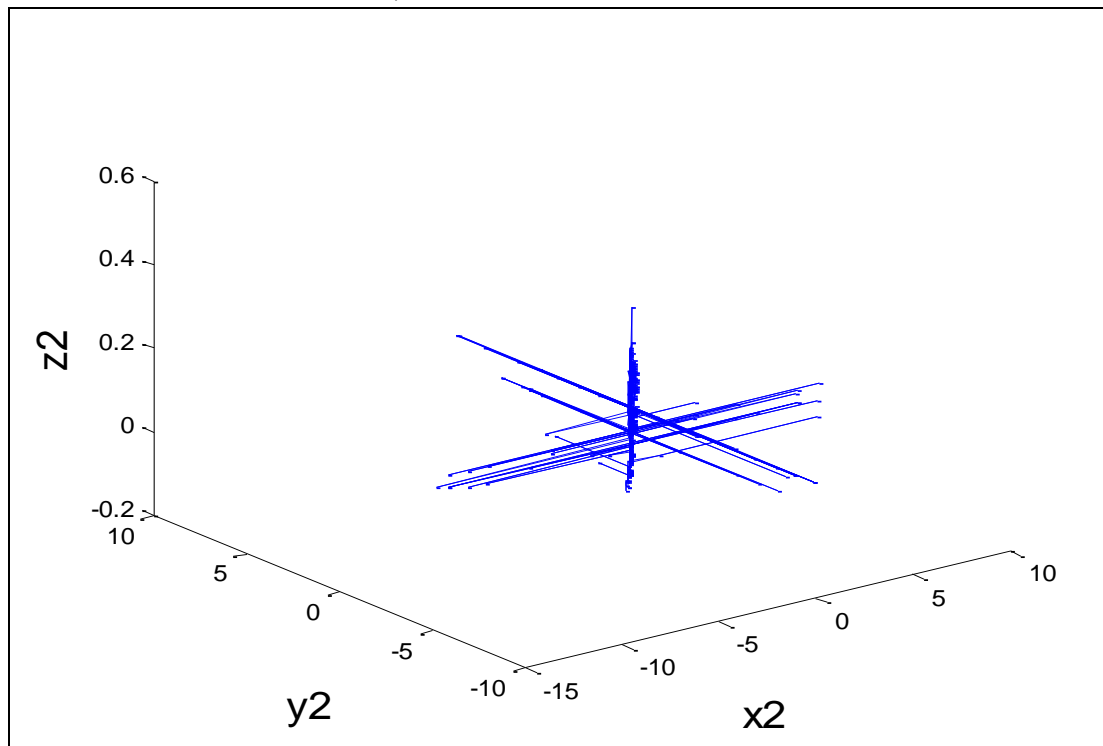
$t=1/20:1/20:1/20*k;$ 

Рисунок В.1 – Наблюдение за реальными данными

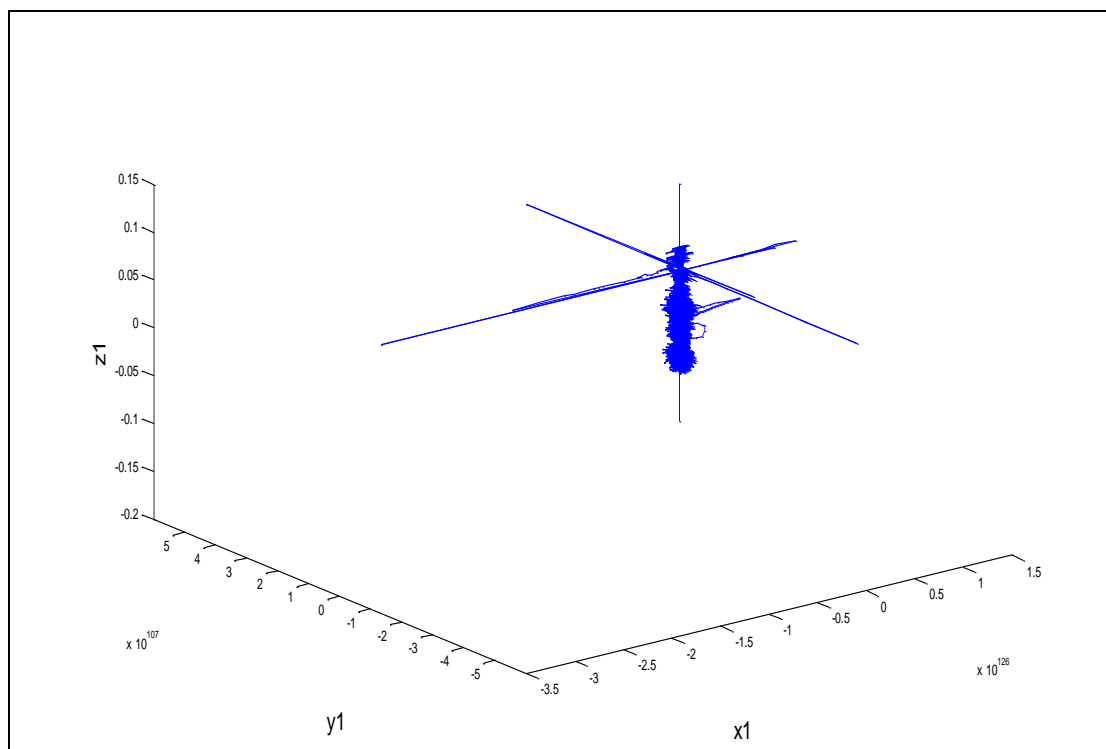


Рисунок В.2 – Результирующие координаты после использования адаптивного фильтра

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

## ИСКАЖЕНИЕ КООРДИНАТ ГНСС

```

load data1;
load data2;
x1=data1(1:40000,1);
x2=data2(1:40000,1);
y1=data1(1:40000,2);
y2=data2(1:40000,2);
z1=data1(1:40000,3);
z2=data2(1:40000,3);
dx=x2-x1;
dxmean=mean(dx);
dy=y2-y1;
dymean=mean(dy);
dz=z2-z1;
dzmean=mean(dz);
d=sqrt(dx.^2+dy.^2);
n=length(y1);
i=1:n;
ds(i)=dz(i)./d(i);
se=atan(ds);
t=1/20:1/20:1/20*n;
figure(5)
plot(se,'r','LineWidth',2)
title('Вращение моста во времени','FontSize',16)
xlabel('Время (сек)','FontSize',16)
h = legend('Угол (градусов)','set1',2);
set(h,'Interpreter','none')

```

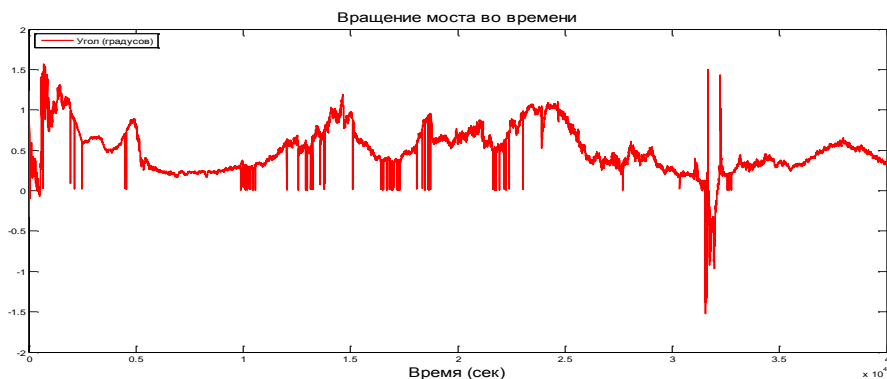


Рисунок Г.1– Вращение моста во времени

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

## ПРОГРАММЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

## Д.1 Нейронная сеть 1

```

close all, clear all, clc
%[x,t] = simplefit_dataset;
x=[0.29    -0.23    2.44    8.30    8.82];
y=[-0.14   0.51    1.54    5.99    5.92];
t=[10,12,14,17,18];
net = feedforwardnet(5);
%view(net);
net = train(net,t,[x;y]);
ynet = net(t);
Xest=ynet(1,:);
Yest=ynet(2,:);
% perf can be calculated using the network's default per-
formance function
% which is "MSE"
%=====
perfx = perform(net,Xest,x);
perfy= perform(net,Yest,y);
%=====
%RMSE=sqrt(sum(sum((y-t).*(y-t)))/length(t))
X_RMSE=sqrt(perfx)
Y_RMSE=sqrt(perfy)
Save the most optimal trained network which has the minimal
RMSE and perf
save mynet net

```

## Д.2 Нейронная сеть 2

```

close all, clear all, clc
load('data.mat');
x=x101;          %<-----
y=y101;
z=z101;
t=1:length(x101); %<-----

```

```

% net1 = feedforwardnet([100,5]);
%net1 = feedforwardnet(30);
net1 = newff(t,x,30);
%view(net);
net1.trainFcn = 'traincgf';
% net1.performFcn='mescauchy';
net1 = train(net1,t,x);
% gin=input('Press any key to continue')
net2 = train(net2,t,y);
% gin=input('Press any key to continue')
Net3 = train(net3,t,z);
xnet = sim(net1,t);
ynet = sim(net2,t);
znet = sim(net3,t);
% perf can be calculated using the network's default per-
formance function
% which is "MSE"
%=====
%perfx = perform(net1,xnet,x)
error=xnet-x;
perfx2=mse(error)
test=1000:2000:48000;
Xtarget=x101(test); %<-----
Xest=xnet(test);
res=[Xtarget' Xest']
% perfy= perform(net2,ynet,y);
%=====
%RMSE=sqrt(sum(sum((y-t).*(y-t)))/length(t))
X_RMSE=sqrt(perfx);
Y_RMSE=sqrt(perfy);
z_RMSE=sqrt(perfz);

Save the most optimal trained network which has the minimal
RMSE and perf
save nettower101 net1 perfx2 res test %<-----
-----

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж  
(обязательное)

ПРОГРАММА МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Ж.1 Данные программы

Таблица Ж1– Данные программы

Время, мин	Нагрузка машин, тон	Смещения (x), см	Температур, С <sup>0</sup>	Ветер, м/с	Смещения (y), см	Влажность Н–Н <sub>0</sub> %
0	11	4,475841	-4,47371	3,510376	2,167170	-3,33444
20	18	5,027953	-4,18071	3,184693	2,971575	-3,33155
40	14	4,735595	-4,07048	3,129055	3,214964	-3,32894
60	15	4,796719	-3,91947	2,773895	2,779650	-3,32489
80	12	4,657353	-3,70956	2,527527	2,480776	-3,32530
100	14	4,815289	-3,39552	2,638397	2,536637	-3,32331
120	16	4,744370	-3,48541	2,885305	2,873131	-3,32456
140	17	4,106371	-3,48518	2,852076	2,416202	-3,32421
160	6	4,288020	-3,54442	2,752369	2,133309	-3,32726
180	14	4,484571	-3,79038	2,823885	2,320872	-3,32677
200	13	4,564967	-4,32414	3,292940	2,540204	-3,33284
220	20	4,389310	-4,75322	3,076777	2,416327	-3,33594
240	12	4,167591	-5,01776	2,941833	2,037053	-3,33817
260	14	4,004087	-5,30016	3,120683	2,493373	-3,34193
280	14	4,094341	-5,30990	3,234351	2,301653	-3,34106
300	19	3,896527	-5,35405	3,244550	2,149240	-3,34261
320	31	3,783624	-5,39127	3,133370	1,488074	-3,34158
340	27	3,765637	-5,44577	3,145507	2,009965	-3,34215
360	32	3,539011	-5,46910	3,115752	1,607857	-3,34319
380	42	3,609941	-5,45624	2,840850	1,568327	-3,34150
400	57	3,162283	-5,46194	2,867164	1,336725	-3,34076
420	105	3,745777	-5,46763	2,670487	1,511670	-3,34173
440	103	3,388928	-5,53525	2,733236	1,500577	-3,34419
460	100	3,558705	-5,47477	2,775938	1,759787	-3,34214
480	146	3,361999	-5,4372	2,498001	2,007649	-3,34259
500	164	3,120600	-5,45454	2,126811	1,722226	-3,34238
520	127	3,111127	-5,39823	2,013145	1,519184	-3,34165
540	166	2,266519	-5,42153	1,739751	1,998340	-3,34317
560	171	2,905377	-5,46791	1,768671	1,415378	-3,34490
580	143	3,903484	-5,56839	1,723321	2,040941	-3,34650
600	158	4,164982	-5,76632	1,517058	2,216552	-3,34447
620	167	4,094449	-5,91812	1,274323	1,971908	-3,34691
640	149	3,899244	-5,85825	1,406813	2,150689	-3,34808
660	127	3,652581	-5,80452	1,515058	1,883235	-3,34678
680	149	3,440710	-6,10304	1,536158	1,853051	-3,34920
700	119	3,855749	-6,16856	1,395952	1,951876	-3,34926

## продолжение таблица Ж.1

Время, мин	Нагрузка машин, тон	Смещения (x), см	Температур, С <sup>0</sup>	Ветер, м/с	Смещения (y), см	Влажность Н-Н <sub>0</sub> %
720	135	3,250141	-6,02351	1,183373	2,234984	-3,35097
740	134	3,724142	-5,95478	1,225927	2,402707	-3,34906
760	132	4,622538	-5,97949	1,118598	2,943934	-3,34937
780	150	4,754333	-5,73481	1,057414	2,695679	-3,34896
800	141	5,010348	-5,70585	0,947174	2,762842	-3,34923
820	114	4,648715	-5,80151	1,041042	2,485884	-3,34778
840	150	4,543662	-5,67710	0,955556	2,564447	-3,34838
860	142	4,356360	-6,07419	1,008240	2,504551	-3,35153
880	163	4,278821	-6,05493	1,111084	2,345703	-3,35247
900	126	4,569229	-6,12832	1,158748	2,218819	-3,35015
920	142	4,362174	-5,80043	1,065029	2,371569	-3,34840
940	132	4,391966	-5,71379	1,120755	2,598278	-3,34719
960	139	4,648036	-5,43499	1,309214	2,348272	-3,34578
980	142	4,767474	-5,37946	1,346657	2,691653	-3,34272
1000	118	4,573066	-5,61640	1,372770	2,561430	-1,21355
1020	130	4,196244	-5,52919	1,288656	2,744622	3,498546
1040	115	3,847608	-5,45375	1,161753	2,301703	0,977477
1060	127	4,395641	-5,59637	1,143759	2,153723	2,444958
1080	104	4,041590	-6,28134	1,186020	2,268764	-2,94299
1100	68	4,209494	-7,05103	1,115202	2,078780	-0,09999
1120	64	4,098996	-6,95298	1,043778	2,286092	1,825411
1140	45	4,014161	-7,16986	1,079686	2,477562	3,794458
1160	43	4,016218	-7,02696	1,258526	2,499643	1,183334
1180	33	3,296137	-6,80932	1,429817	2,088487	-3,35361
1200	40	3,904779	-6,82248	1,631823	2,114361	-3,35006
1220	29	3,807032	-6,33190	1,715470	2,167439	-3,34484
1240	30	3,822639	-5,52468	1,606188	2,205600	-3,33754
1260	36	4,167729	-4,97982	1,558289	2,903555	-3,33291
1280	28	3,790453	-4,55539	1,378941	2,028028	-3,33161
1300	29	4,240981	-3,88600	1,402372	2,658342	-3,32350
1320	20	4,539618	-3,51316	1,807490	2,693855	-3,32156
1340	13	4,067894	-3,25740	1,927995	2,484039	-3,31966
1360	13	4,294912	-3,01598	1,939646	2,451865	-3,31845
1380	19	3,887716	-2,85439	1,102641	2,447725	-3,31747
1400	13	3,107527	-2,78880	1,140728	2,172445	-3,31750
1420	11	3,648932	-2,76662	0,824921	2,039141	-3,31551
1440	14	4,002877	-2,31101	1,194690	1,810351	-3,31106
1460	15	4,486825	-2,59742	0,740389	2,701972	-3,31220
1480	3	3,922313	-3,35847	0,820644	2,545961	-3,31819
1500	15	3,963255	-3,25624	1,067633	2,190747	-3,31843
1520	9	4,196049	-3,29306	0,423028	2,074160	-3,31925
1540	11	3,980906	-2,91755	0,729692	1,960547	-3,31664
1560	10	3,844584	-3,46544	0,901803	2,303370	-3,32171
1580	15	3,631512	-3,08044	1,569790	2,158352	-3,31853
1600	12	4,062791	-2,82084	1,773073	1,811086	-3,31681
1620	12	3,892189	-3,17331	2,479200	1,992141	-3,32021

## продолжение таблица Ж.1

Время, мин	Нагрузка машин, тон	Смещения (x), см	Температур, С <sup>0</sup>	Ветер, м/с	Смещения (y), см	Влажность Н-Н <sub>0</sub> %
1640	18	4,270259	-3,36486	1,249036	2,304647	-3,32245
1660	21	4,236751	-3,62690	0,620058	2,439930	-3,32337
1680	17	3,953506	-3,92928	0,819644	1,848033	-3,32577
1700	12	3,367324	-4,02790	0,26891	2,047476	-3,33015
1720	17	3,863311	-4,03338	1,054363	1,964844	-3,32995
1740	19	3,601339	-4,00068	1,478759	2,045031	-3,33028
1760	21	3,565896	-4,02592	2,403809	1,155659	-3,33107
1780	24	3,380102	-4,03158	1,442604	1,817475	-3,33121
1800	31	3,471183	-4,04435	0,965297	1,615910	-3,32998
1820	46	3,447373	-4,26710	1,078384	1,640975	-3,33150
1840	63	3,085699	-4,23829	0,791223	1,574642	-3,33152
1860	71	3,878722	-4,20821	0,668061	1,540365	-3,33068
1880	100	3,632440	-4,24117	0,800163	1,782988	-3,33304
1900	102	3,417838	-4,02557	0,972098	1,780276	-3,33084
1920	137	3,468741	-4,06240	0,563336	2,018287	-3,33338
1940	155	2,864283	-4,09582	0,477851	1,692707	-3,33334
1960	147	2,804520	-3,88664	0,446327	1,439827	-3,33111
1980	207	2,361789	-3,85203	0,396041	2,005718	-3,33125
2000	200	3,097184	-4,16280	0,748507	1,451781	-3,33244
2020	157	4,170247	-4,17283	0,512265	2,093658	-3,33294
2040	167	4,179208	-4,29197	0,581478	2,249261	-3,33590
2060	160	4,358860	-4,43375	1,38158	2,199870	-3,33665
2080	155	4,828256	-4,50190	1,144079	2,877381	-3,33753
2100	160	4,768972	-4,62057	0,574234	2,976633	-3,34021
2120	118	4,361989	-4,86399	0,762861	2,696871	-3,33826
2140	92	5,031322	-5,34424	2,443158	2,720691	-3,34346
2160	155	4,396922	-5,58110	2,543841	3,116641	-3,34663
2180	166	4,636425	-5,59521	2,519777	2,927110	-3,34712
2200	118	5,265093	-5,61479	2,691857	3,380368	-3,34720
2220	160	5,182154	-5,71152	1,899467	2,931680	-3,34658
2240	144	5,389818	-5,67984	1,749328	2,938636	-3,34843
2260	141	5,151083	-5,85929	1,939662	2,757933	-3,35015
2280	149	4,925798	-6,25746	1,795561	2,843762	-3,35273
2300	140	4,989004	-6,58731	1,507218	2,993689	-3,35827
2320	144	4,907381	-6,66827	1,308762	2,690567	-3,35833
2340	163	4,792508	-6,68289	1,378221	2,468303	-3,35628
2360	144	4,859134	-6,74735	1,188512	2,535969	-3,35677
2380	124	5,281828	-6,88910	1,891312	3,269258	-3,35791
2400	146	5,083421	-6,83038	1,850369	2,810713	-3,35914
2420	140	5,074863	-7,04946	2,891422	2,706793	-3,35871
2440	129	4,844773	-7,12407	2,669143	2,869212	-3,36129
2460	135	4,721994	-7,11827	1,790560	3,115779	-3,36216
2480	110	4,548109	-6,75953	1,019177	2,592483	-3,35936
2500	108	4,825971	-6,84956	0,900148	2,721503	-3,36038
2520	87	4,985406	-7,05442	1,434986	2,689140	-3,36410
2540	90	4,746171	-7,30148	1,347360	2,530805	-3,36560

## продолжение таблица Ж.1

Время, мин	Нагрузка машин, тон	Смещения (x), см	Температур, С <sup>0</sup>	Ветер, м/с	Смещения (y), см	Влажность Н-Н <sub>0</sub> %
2560	63	5,214933	-7,41295	1,538990	2,920714	-3,36662
2580	61	4,207841	-7,53198	1,308435	2,635760	-3,36771
2600	50	4,497560	-7,56381	1,673024	3,036149	-3,36525
2620	29	4,171077	-7,05719	1,622701	2,617952	-3,35813
2640	47	4,519519	-7,47633	1,442156	2,507839	-3,36194
2660	43	4,439042	-7,57834	1,353517	2,505664	-3,36522
2680	32	4,260972	-7,11361	1,461695	2,698107	-3,35928
2700	29	3,915569	-6,54028	1,531425	2,353384	-3,35513
2720	26	4,307305	-6,00353	1,056487	2,372774	-3,34722
2740	23	4,059068	-5,79090	1,178312	2,670490	-3,34541
2760	20	4,067301	-5,20539	1,004265	2,336727	-3,33841
2780	27	4,277755	-4,19296	1,537110	2,474904	-3,33017
2800	16	4,486283	-3,36254	1,575010	2,655415	-3,32428
2820	19	4,076998	-2,33140	2,273036	2,868611	-3,31632
2840	21	4,008767	-1,57453	3,185621	2,781248	-3,30912
2860	9	3,946361	-1,24483	2,638988	1,933456	-3,30609
2880	16	4,258269	-1,05948	2,991104	2,274427	-3,30063
2900	12	4,360009	-0,71054	3,350009	2,587975	-3,29935
2920	11	4,191832	-0,40833	3,625243	2,680152	-3,29707
2940	16	4,599368	0,005280	3,102391	2,650092	-3,29340
2960	17	5,010315	0,465443	3,067449	2,684673	-3,29020
2980	12	4,840909	0,508837	3,385892	2,569863	-3,28894
3000	13	4,654578	0,788454	3,033501	2,754828	-3,28712
3020	10	3,921800	-0,237130	2,838246	2,299594	-3,29255
3040	16	4,285319	-1,12316	2,537588	1,942452	-3,29793
3060	15	4,126197	-1,37450	2,292872	2,136676	-3,30240
3080	12	4,730543	-1,52482	2,343958	2,489352	-3,30415
3100	16	4,412132	-1,85686	1,954560	2,689730	-3,30769
3120	21	4,668964	-2,15746	2,462706	2,403737	-3,31057
3140	14	4,098540	-2,18723	2,782721	2,595583	-3,31177
3160	17	4,238956	-2,26069	2,645607	2,209288	-3,31415
3180	20	3,871880	-2,45560	3,043413	1,937083	-3,31400
3200	11	3,715129	-2,78778	3,612024	1,226922	-3,31767
3220	32	3,655789	-3,03222	3,471109	1,782850	-3,31850
3240	36	3,509858	-3,29750	3,246770	1,636098	-3,32078
3260	38	3,431253	-3,50858	3,509857	1,452721	-3,32316
3280	42	3,287349	-3,62774	3,027464	1,555592	-3,32516
3300	81	4,056469	-3,88516	2,907049	1,397030	-3,32653
3320	87	3,452507	-3,70533	2,593863	1,859020	-3,33020
3340	86	3,387648	-3,66204	2,784747	1,930711	-3,33117
3360	112	3,810523	-3,80000	3,360168	2,023484	-3,32833
3380	123	3,697950	-4,02288	3,651954	2,405868	-3,32964
3400	150	4,040587	-4,14292	3,865066	2,367027	-3,33120
3420	144	3,438268	-4,20775	4,027771	2,463105	-3,32927
3440	149	3,941106	-4,31092	3,884446	1,931516	-3,33018
3460	137	5,367548	-4,20768	3,942075	2,956783	-3,33123

## продолжение таблица Ж.1

Время, мин	Нагрузка машин, тон	Смещения (x), см	Температур, С <sup>0</sup>	Ветер, м/с	Смещения (y), см	Влажность Н-Н <sub>0</sub> %
3480	167	5,480261	-4,34246	3,489185	3,137859	-3,33169
3500	150	5,493520	-4,64179	3,361442	3,050237	-3,33798
3520	134	5,565306	-4,97888	3,704137	3,407418	-3,33814
3540	118	5,430375	-5,31588	4,448083	3,168035	-3,34090
3560	118	5,590000	-5,43339	4,282731	3,546990	-3,34204
3580	111	5,771300	-5,51834	4,656252	3,504627	-3,34458
3600	109	5,222284	-5,57002	4,688176	3,945596	-3,34460
3620	109	5,546183	-5,61964	5,070984	3,490155	-3,34614
3640	109	6,019378	-5,69783	4,955805	3,796377	-3,34768
3660	128	6,210536	-5,74674	4,251575	3,699524	-3,34970
3680	124	6,046991	-5,82433	3,949999	3,302624	-3,35010
3700	120	6,274745	-5,87626	3,159253	3,503788	-3,34936
3720	132	6,183662	-5,88654	2,522342	3,849215	-3,35107
3740	111	6,028442	-6,00229	2,492139	3,777633	-3,35194
3760	123	6,076887	-6,20952	2,887773	3,499582	-3,35424
3780	116	5,780596	-6,34334	3,167573	3,509894	-3,35328
3800	109	6,317519	-6,46801	2,887847	3,598131	-3,35387
3820	129	6,340349	-6,55204	2,843232	3,917500	-3,35410
3840	122	6,086889	-6,75534	3,051137	3,513551	-3,35512
3860	107	5,861687	-6,94498	2,952619	3,084989	-3,35767
3880	123	5,215027	-7,16548	3,392351	3,304018	-3,35716
3900	115	5,270400	-7,31456	3,152604	3,521238	-3,35828
3920	94	5,733453	-7,57801	3,995419	3,236202	-3,36254
3940	100	5,041776	-7,81438	3,987863	3,144124	-3,36503
3960	74	5,067230	-7,97509	3,300874	2,531995	-3,36740
3980	70	5,208622	-8,18893	3,083021	2,908040	-3,37010
4000	51	5,184571	-8,49507	2,983286	3,117315	-3,37214
4020	56	5,117774	-8,55370	2,862243	3,320561	-3,37231
4040	40	4,980369	-8,68431	2,804200	3,406514	-3,37115
4060	39	5,402284	-8,75525	2,535161	3,333640	-3,37190
4080	37	5,530719	-8,25697	2,507594	3,293479	-3,36680
4100	43	4,948858	-8,11978	2,254053	2,777916	-3,36761
4120	38	4,389543	-7,86273	2,233657	3,082594	-3,36521
4140	35	4,822624	-7,48148	2,138264	2,927192	-3,36274
4160	21	4,899961	-6,97717	2,046407	2,948494	-3,35795
4180	36	4,645152	-6,38550	2,195512	3,004825	-3,35076
4200	26	5,343393	-6,15031	2,491068	3,142849	-3,34893
4220	22	5,766615	-5,59290	2,648992	3,443586	-3,34235
4240	14	4,674766	-5,71148	2,096754	2,740108	-3,34533
4260	13	4,253432	-5,01927	1,556990	2,880721	-3,33936
4280	22	4,226282	-5,35324	1,584772	2,943311	-3,34147
4300	18	4,457717	-5,56170	1,862037	2,164216	-3,34231

## Ж.2 Текст программы

```

clc
load('traffic_no.mat') %Traffic Number
load('hmm.mat') %humid
load('tmm.mat') %temp
load('wmm.mat') %wind
load('mm.mat') %yn
load('xmm.mat') %xn
xmm=xxx'
mm=xa'
% load desired Z data
%Data splitting as training and test(prediction)
percent=length(hmm)*2/3;
hmt=hmm(1:round(percent));hmp=hmm(round(percent)+1:end);
traft=traf(1:round(percent));trafp=traf(round(percent)+1:en
d);
tmt=tmm(1:round(percent));tmp=tmm(round(percent)+1:end);
wmt=wmm(1:round(percent));wmp=wmm(round(percent)+1:end);

tt=1:20:4320;
t=tt(1:round(percent));
tp=tt(1,round(percent)+1:end);
x=xmm(1:round(percent)); y=mm(1:round(percent));
z=xmm(1:round(percent));
xp=xmm(1,round(percent)+1:end);
yp=mm(1,round(percent)+1:end);
zp=xmm(1,round(percent)+1:end);
%-----

mychoice = input('Enter Your Choice one for K OR two for
D')
switch mychoice
    case 1 %K
        Kk = input('Kinmatic Method one for NN, two for
POLY and Three for EXP')
        switch Kk
            case 1 % K-1: NN
                %== K-1: NN , K-2: REG-POLY, AND K-3:REG-EXP
                kchoice=input('Enter Your No of Coordinates You
Have 1, 2, OR 3')
                switch kchoice
                    case 3

```

```

hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
for i=1:10
    hnn=hnn+5;
net = feedforwardnet(hnn);
%view(net);
% net.trainFcn = 'traincgf';
net = train(net,t,[x;y;z]);
ynet = net(tp);
Xest=ynet(1,:);
Yest=ynet(2,:);
Zest=ynet(3,:);
% perf can be calculated using the network's default per-
formance function
% which is "MSE"
%=====
perfx = perform(net,Xest, xp);
perfy= perform(net,Yest, yp);
perfz= perform(net,Zest, zp);
%=====
X_RMSE=sqrt(perfx);
Y_RMSE=sqrt(perfy);
Z_RMSE=sqrt(perfz);

MAXx=max(Xest-xp); % xmm optional data in our case xmm=x
MAXy=max(Yest-yp); % mm optional data in our case mm=
MAXz=max(Zest-zp); % as it will be
delta(i)=sqrt(MAXx^2+MAXy^2+MAXz^2);
mynet{i}=net;
%-----
end
delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);
optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet(tp);
figure(1)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(1,:),'+'),title('X-координаты про-
гнозирования с использованием нейронной сети')

```

```

xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
figure(2)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(2,:),'+'),title('Y- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(y)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
figure(3)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(3,:),'+'),title('Z- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(z)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
%save optnetandmindel3K optnet mindelta
%=====
case 2

hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
for i=1:10
    hnn=hnn+5;
net = feedforwardnet(hnn);
net = train(net,t,[x;y]);
ynet = net(tp);
Xest=ynet(1,:);
Yest=ynet(2,:);

% perf can be calculated using the network's default per-
formance function
% which is "MSE"
%=====
perfx = perform(net,Xest,xp);
perfy= perform(net,Yest,yp);
%=====
X_RMSE=sqrt(perfx);
Y_RMSE=sqrt(perfy);

MAXx=max(Xest-xp); % xmm optional data in our case xmm=x
MAXy=max(Yest-yp); % mm optional data in our case mm=

delta(i)=sqrt(MAXx^2+MAXy^2);
mynet{i}=net;
%-----
end
delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);

```

```

optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet(tp);
figure(1)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(1,:),'+'),title('X- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные','Оценка')
figure(2)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(2,:),'+'),title('Y- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(y)'),legend('Реальные данные','Оценка')
%save optnetandmindel3K optnet mindelta
%=====
case 1
  hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
  for i=1:10
    hnn=hnn+5;
  net = feedforwardnet(hnn);
  %view(net);
  % net.trainFcn = 'traincgf';
  net = train(net,t,x);
  ynet = net(tp);
  Xest=ynet(1,:);

  % perf can be calculated using the network's default per-
  formance function
  % which is "MSE"
  %=====
  perfx = perform(net,Xest,xp);
  %=====
  X_RMSE=sqrt(perfx);

  MAXx=max(Xest-xp); % xmm optional data in our case xmm=x

  delta(i)=sqrt(MAXx^2);
  mynet{i}=net;
  %-----
end

```

```

delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);
optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet(tp);
figure(1)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(1,:),'+'),title('X- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
%save optnetandmindel3K optnet mindelta
otherwise
disp('Not Valid Input')
end
case 2 %K-2: REG-POLY
Px1=polyfit(t,x,1);
Pxeq1=inline('Px1(1)*t+Px1(2)', 't', 'Px1')
maxerrx1=max(abs(Pxeq1(tp,Px1)-xp))
FD_Pxeq1=[tp;xp;Pxeq1(tp,Px1);(Pxeq1(tp,Px1)-
xp)]'
figure(1)
plot(FD_Pxeq1(:,1),
FD_Pxeq1(:,2),'ok',FD_Pxeq1(:,1),FD_Pxeq1(:,3),'+k'),grid
title('X- координаты прогнозирования с ис-
пользованием линейного уравнения')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
Py1=polyfit(t,y,1);
Pyeq1=inline('Py1(1)*t+Py1(2)', 't', 'Py1')
maxerry1=max(abs(Pyeq1(tp,Py1)-yp))
FD_Pyeq1=[tp;yp;Pyeq1(tp,Py1);(Pyeq1(tp,Py1)-
yp)]'
figure(2)
plot(FD_Pyeq1(:,1),
FD_Pyeq1(:,2),'or',FD_Pyeq1(:,1),FD_Pyeq1(:,3),'+r'),grid
title('y- координаты прогнозирования с ис-
пользованием линейного уравнения')

```

```

        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        Pz1=polyfit(t,z,1);
        Pzeq1=inline('Pz1(1)*t+Pz1(2)', 't', 'Pz1')
        maxerrz1=max(abs(Pzeq1(tp,Pz1)-zp))
        FD_Pzeq1=[tp; zp; Pzeq1(tp,Pz1); (Pzeq1(tp,Pz1)-zp)]'
        figure(3)
        plot( FD_Pzeq1(:,1),
        FD_Pzeq1(:,2), 'ob', FD_Pzeq1(:,1), FD_Pzeq1(:,3), '+b'), grid
        title('z- координаты прогнозирования с ис-
пользованием линейного уравнения')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')
        %-----
        Px2=polyfit(t,x,2);

        Pxeq2=inline('Px2(1)*t.^2+Px2(2)*t+Px2(3)', 't', 'Px2')
        maxerrx2=max(abs(Pxeq2(tp,Px2)-xp))
        FD_Pxeq2=[tp; xp; Pxeq2(tp,Px2); (Pxeq2(tp,Px2)-
xp)]'
        figure(4)
        plot( FD_Pxeq2(:,1),
        FD_Pxeq2(:,2), 'ok', FD_Pxeq2(:,1), FD_Pxeq2(:,3), '+k'), grid
        title('x- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена второй степени')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        Py2=polyfit(t,y,2);

        Pyeq2=inline('Py2(1)*t.^2+Py2(2)*t+Py2(3)', 't', 'Py2')
        maxerry2=max(abs(Pyeq2(tp,Py2)-yp))
        FD_Pyeq2=[tp; yp; Pyeq2(tp,Py2); (Pyeq2(tp,Py2)-
yp)]'
        figure(5)
        plot( FD_Pyeq2(:,1),
        FD_Pyeq2(:,2), 'or', FD_Pyeq2(:,1), FD_Pyeq2(:,3), '+r'), grid
        title('y- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена второй степени')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        Pz2=polyfit(t,z,2);

```

```

Pzeq2=inline('Pz2(1)*t.^2+Pz2(2)*t+Pz2(3)','t','Pz2')
maxerrz2=max(abs(Pzeq2(tp,Pz2)-zp))
FD_Pzeq2=[tp;zp;Pzeq2(tp,Pz2);(Pzeq2(tp,Pz2)-
zp)]'
figure(6)
plot(FD_Pzeq2(:,1),
FD_Pzeq2(:,2),'ob',FD_Pzeq2(:,1),FD_Pzeq2(:,3),'+b'),grid
title('z- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена второй степени')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(z)'),legend('Реальные данные','Оценка')
%-----
Px3=polyfit(t,x,3);

Pxeq3=inline('Px3(1)*t.^3+Px3(2)*t.^2+Px3(3)*t+Px3(4)','t',
'Px3')
maxerrx3=max(abs(Pxeq3(tp,Px3)-xp))
FD_Pxeq3=[tp;xp;Pxeq3(tp,Px3);(Pxeq3(tp,Px3)-
xp)]'
figure(7)
plot(FD_Pxeq3(:,1),
FD_Pxeq3(:,2),'ok',FD_Pxeq3(:,1),FD_Pxeq3(:,3),'+k'),grid
title('x- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена третьей степени')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные','Оценка')

Py3=polyfit(t,y,3);

Pyeq3=inline('Py3(1)*t.^3+Py3(2)*t.^2+Py3(3)*t+Py3(4)','t',
'Py3')
maxerry3=max(abs(Pyeq3(tp,Py3)-yp))
FD_Pyeq3=[tp;yp;Pyeq3(tp,Py3);(Pyeq3(tp,Py3)-
yp)]'
figure(8)
plot(FD_Pyeq3(:,1),
FD_Pyeq3(:,2),'or',FD_Pyeq3(:,1),FD_Pyeq3(:,3),'+r'),grid
title('y- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена третьей степени')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(y)'),legend('Реальные данные','Оценка')

Pz3=polyfit(t,z,3);

```

```

Pzeq3=inline('Pz3(1)*t.^3+Pz3(2)*t.^2+Pz3(3)*t+Pz3(4)', 't',
'Pz3')
    maxerrz3=max(abs(Pzeq3(tp,Pz3)-zp))
    FD_Pzeq3=[tp; zp; Pzeq3(tp,Pz3); (Pzeq3(tp,Pz3)-
zp)]'
    figure(9)
    plot( FD_Pzeq3(:,1),
FD_Pzeq3(:,2), 'ob', FD_Pzeq3(:,1), FD_Pzeq3(:,3), '+b'), grid
    title('z- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена третьей степени')
    xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')
    %-----
    Px4=polyfit(t,x,4);

Pxeq4=inline('Px4(1)*t.^4+Px4(2)*t.^3+Px4(3)*t.^2+Px4(4)*t+
Px4(5)', 't', 'Px4')
    maxerrx4=max(abs(Pxeq4(tp,Px4)-xp))
    FD_Pxeq4=[tp; xp; Pxeq4(tp,Px4); (Pxeq4(tp,Px4)-
xp)]'
    figure(10)
    plot( FD_Pxeq4(:,1),
FD_Pxeq4(:,2), 'ok', FD_Pxeq4(:,1), FD_Pxeq4(:,3), '+k'), grid
    title('x- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена четвертой степени ')
    xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

    Py4=polyfit(t,y,4);

Pyeq4=inline('Py4(1)*t.^4+Py4(2)*t.^3+Py4(3)*t.^2+Py4(4)*t+
Py4(5)', 't', 'Py4')
    maxerry4=max(abs(Pyeq4(tp,Py4)-yp))
    FD_Pyeq4=[tp; yp; Pyeq4(tp,Py4); (Pyeq4(tp,Py4)-
yp)]'
    figure(11)
    plot( FD_Pyeq4(:,1),
FD_Pyeq4(:,2), 'or', FD_Pyeq4(:,1), FD_Pyeq4(:,3), '+r'), grid
    title('y- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена четвертой степени ')
    xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

    Pz4=polyfit(t,z,4);

```

```

Pzeq4=inline('Pz4(1)*t.^4+Pz4(2)*t.^3+Pz4(3)*t.^2+Pz4(4)*t+
Pz4(5)', 't', 'Pz4')
    maxerrz4=max(abs(Pzeq4(tp,Pz4)-zp))
    FD_Pzeq4=[tp; zp; Pzeq4(tp,Pz4); (Pzeq4(tp,Pz4)-
zp)]'
        figure(12)
        plot( FD_Pzeq4(:,1),
FD_Pzeq4(:,2), 'ob', FD_Pzeq4(:,1), FD_Pzeq4(:,3), '+b'), grid
        title('z- координаты прогнозирования с ис-
пользованием многочлена четвертой степени ')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        case 3    %K-3: REG-EXP
            Xx=[ones(size(t)) exp(-t) t.*exp(-t)];
%take care your data must be in columns
            ax=Xx\t;
            expeqx=inline('ax(1)*t.*exp(-t)+ax(2)*exp(-
t)+ax(3)', 't', 'ax')
            maxerrxexp=max(abs(expeqx(tp,ax)-xp))

FD_expeqx=[tp; xp; expeqx(tp,ax); (expeqx(tp,ax)-xp)] '%new
            figure(13)
            plot( FD_expeqx(:,1),
FD_expeqx(:,2), 'ok', FD_expeqx(:,1), FD_expeqx(:,3), '+k'), gri
d
            title('x- координаты прогнозирования с ис-
пользованием экспоненциального уравнения')
            xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

            Yy=[ones(size(t)) exp(-t) t.*exp(-t)];
%take care your data must be in columns
            ay=Yy\t;
            expeqy=inline('ay(1)*t.*exp(-t)+ay(2)*exp(-
t)+ay(3)', 't', 'ay')
            maxerryexp=max(abs(expeqy(tp,ay)-yp))

FD_expeqy=[tp; yp; expeqy(tp,ay); (expeqy(tp,ay)-yp)]'
            figure(14)
            plot( FD_expeqy(:,1),
FD_expeqy(:,2), 'or', FD_expeqy(:,1), FD_expeqy(:,3), '+r'), gri
d

```

```

        title('y- координаты прогнозирования с использованием экспоненциального уравнения')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения (y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        Zz=[ones(size(t)) exp(-t) t.*exp(-t)];
%take care your data must be in columns
        az=Zz\t;
        expeqz=inline('az(1)*t.*exp(-t)+az(2)*exp(-t)+az(3)', 't', 'az');
        maxerrzexp=max(abs(expeqz(tp, az)-zp))

FD_expeqz=[tp; zp; expeqz(tp, az); (expeqz(tp, az)-zp)]'
        figure(15)
        plot( FD_expeqz(:,1),
FD_expeqz(:,2), 'ob', FD_expeqz(:,1), FD_expeqz(:,3), '+b'), grid

        title('z- координаты прогнозирования с использованием экспоненциального уравнения')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения (z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        splx=spline(t, x, xp);
        maxerrsplx=max(abs(splx-xp))
        FD_splx=[tp; xp; splx; (splx-xp)]'
        figure(16)
        plot( FD_splx(:,1),
FD_splx(:,2), 'ok', FD_splx(:,1), FD_splx(:,3), '+k'), grid
        title('x- координаты прогнозирования с использованием сплайна')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения (x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

        sply=spline(t, y, yp);
        maxerrsply=max(abs(sply-yp))
        FD_sply=[tp; yp; sply; (sply-yp)]'
        figure(17)
        plot( FD_sply(:,1),
FD_sply(:,2), 'or', FD_sply(:,1), FD_sply(:,3), '+r'), grid
        title('y- координаты прогнозирования с использованием сплайна')
        xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения (y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

```

```

        splz=spline(t,z,zp);
        maxerrsplz=max(abs(splz-zp))
        FD_splz=[tp;zp;splz;(splz-zp)]'
        figure(18)
        plot( FD_splz(:,1),
FD_splz(:,2), 'ob',FD_splz(:,1),FD_splz(:,3), '+b'),grid
        title('z- координаты прогнозирования с ис-
пользованием сплайна')
        xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(z)'),legend('Реальные данные', 'Оценка')
        otherwise
        disp('Not Valid Input')
        end

%=====start of the second choice of
first SWITCH
        case 2 %D
            Dchoice=input('Enter Your No of Coordinates You Have 1,
2, 3 For using NN OR Enter 4 for Regression')
            switch Dchoice
                case 1
%=====
hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
for i=1:10
    hnn=hnn+5;
net = feedforwardnet(hnn);
%view(net);
% net.trainFcn = 'traincgf';
net= train(net,[hmt;traft;tmt;wmt;t],[x]);
ynet = net([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
Xest=ynet(1,:);

%=====
perfx = perform(net,Xest,xp);
%=====
X_RMSE=sqrt(perfx);

% calculate the maximum difference between estimated and
original direction
%=====MA
Xx=max(Xest-xp);
delta(i)=sqrt(MAXx^2);
%-----
    mynet{i}=net;
%-----

```

```

end
delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);
optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
figure(1)
plot(tp, xp, 'o', tp, optest(1,:), '+'), title('X-координаты про-
гнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')
%save optnetandmindel3D optnet mindelta
        case 2
%=====
hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
for i=1:10
    hnn=hnn+5;
net = feedforwardnet(hnn);
%view(net);
% net.trainFcn = 'traincgf';
net= train(net,[hmt;traft;tmt;wmt;t],[x;y]);
ynet = net([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
Xest=ynet(1,:);
Yest=ynet(2,:);
%=====
perfx = perform(net,Xest,xp);
perfy= perform(net,Yest,yp);
%=====
X_RMSE=sqrt(perfx);
Y_RMSE=sqrt(perfy);

% calculate the maximum difference between estimated and
original direction
%=====
MAXx=max(Xest-xp);
MAXy=max(Yest-yp);

delta(i)=sqrt(MAXx^2+MAXy^2);
%-----

```

```

mynet{i}=net;
%-----
end
delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);
optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
figure(1)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(1,:),'+'),title('X-координаты про-
гнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные','Оценка')
figure(2)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(2,:),'+'),title('Y- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(y)'),legend('Реальные данные','Оценка')
%save optnetandmindel3D optnet mindelta
      case 3
%=====
hnn=0; %number of hidden neurons in hidden layer
for i=1:10
    hnn=hnn+5;
net = feedforwardnet(hnn);

net= train(net,[hmt;traft;tmt;wmt;t],[x;y;z]);
ynet = net([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
Xest=ynet(1,:);
Yest=ynet(2,:);
Zest=ynet(3,:);
%=====
perfx = perform(net,Xest,xp);
perfy= perform(net,Yest,yp);
perfz= perform(net,Zest,zp);
%=====
X_RMSE=sqrt(perfx);
Y_RMSE=sqrt(perfy);
Z_RMSE=sqrt(perfz);

```

```

% calculate the maximum difference between estimated and
original direction
%=====
MAXx=max(Xest-xp);
MAXy=max(Yest-yp);
MAXz=max(Zest-zp);
delta=MAXx+MAXy+MAXz;
delta(i)=sqrt(MAXx^2+MAXy^2+MAXz^2);
%-----
    mynet{i}=net;
%-----
end
delta=delta+1;
[m,n]=find(delta==min(delta));
onet=mynet(m,n);
optnet=onet{1};
disp('=====')
delta
disp('=====')
mindelta=min(delta)
disp('=====')
% Test of optimal neural network
optest=optnet([hmp;trafp;tmp;wmp;tp]);
figure(1)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(1,:),'+'),title('X- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(x)'),legend('Реальные данные','Оценка')
figure(2)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(2,:),'+'),title('Y- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(y)'),legend('Реальные данные','Оценка')
figure(3)
plot(tp,xp,'o',tp,optest(3,:),'+'),title('Z- координаты
прогнозирования с использованием нейронной сети')
xlabel('Время (минуты)'),ylabel('смещения
(z)'),legend('Реальные данные','Оценка')
%save optnetandmindel3D optnet mindelta
    otherwise
        ##### FOR X Dir
        xrl=[ones(size(x')) hmt' traft' tmt' wmt'];
        axrl=xrl\x';

```

```

xReg1=inline('axr1(5)*wmt+axr1(4)*tmt+axr1(3)*traft+axr1(2)
*hmt+axr1(1)', 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'axr1')
maxerrxReg1
=max(abs(xReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,axr1)-xp))

FD_xReg1=[tp;xp;xReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,axr1);(xReg1(hmp,trafp,
tmp,wmp,axr1)-xp)]'
figure(101)
plot(FD_xReg1(:,1),
FD_xReg1(:,2), 'ok', FD_xReg1(:,1), FD_xReg1(:,3), '+k'), grid
title('x- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 1')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

xr2=[ones(size(x')) hmt' traft' tmt' wmt'
(hmt.*traft)' (hmt.*tmt)' (hmt.*wmt)' (hmt.^2)'...
(traft.*tmt)' (traft.*wmt)' (traft.^2)'
(tmt.*wmt)' (tmt.^2)' (wmt.^2)'];
axr2=xr2\x';

xReg2=inline('axr2(15)*(wmt.^2)+axr2(14)*(tmt.^2)+axr2(13)*
(tmt.*wmt)+axr2(12)*(traft.^2)+axr2(11)*(traft.*wmt)+axr2(10)
*(traft.*tmt)+axr2(9)*(hmt.^2)+axr2(8)*(hmt.*wmt)+axr2(7)
*(hmt.*tmt)+axr2(6)*(hmt.*traft)+axr2(5)*wmt+axr2(4)*tmt+axr2(3)
*traft+axr2(2)*hmt+axr2(1)'...
, 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'axr2')
maxerrxReg2
=max(abs(xReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,axr2)-xp))
FD_xReg2=[tp;xp;xReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,axr2);(xReg2(hmp,trafp,
tmp,wmp,axr2)-xp)]'
figure(102)
plot(FD_xReg2(:,1),
FD_xReg2(:,2), 'ok', FD_xReg2(:,1), FD_xReg2(:,3), '+k'), grid
title('x- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 2')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(x)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

##### FOR Y Dir
yr1=[ones(size(y')) hmt' traft' tmt' wmt'];
ayr1=yr1\y';

```

```

yReg1=inline('ayr1(5)*wmt+ayr1(4)*tmt+ayr1(3)*traft+ayr1(2)
*hmt+ayr1(1)', 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'ayr1')
maxerry-
Reg1=max(abs(yReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,ayr1)-yp))

FD_yReg1=[tp;yp;yReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,ayr1);(yReg1(hmp,trafp,
tmp,wmp,ayr1)-yp)]'
figure(103)
plot(FD_yReg1(:,1),
FD_yReg1(:,2), 'or', FD_yReg1(:,1), FD_yReg1(:,3), '+r'), grid
title('y- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 1')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

yr2=[ones(size(y')) hmt' traft' tmt' wmt'
(hmt.*traft)' (hmt.*tmt)' (hmt.*wmt)' (hmt.^2)'. . .
(traft.*tmt)' (traft.*wmt)' (traft.^2)'
(tmt.*wmt)' (tmt.^2)' (wmt.^2)'];
ayr2=yr2\y';

yReg2=inline('ayr2(15)*(wmt.^2)+ayr2(14)*(tmt.^2)+ayr2(13)*
(tmt.*wmt)+ayr2(12)*(traft.^2)+ayr2(11)*(traft.*wmt)+ayr2(10)
*(traft.*tmt)+ayr2(9)*(hmt.^2)+ayr2(8)*(hmt.*wmt)+ayr2(7)
*(hmt.*tmt)+ayr2(6)*(hmt.*traft)+ayr2(5)*wmt+ayr2(4)*tmt+ayr2(3)
*traft+ayr2(2)*hmt+ayr2(1)'. . .
, 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'ayr2')
maxerry-
Reg2=max(abs(yReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,ayr2)-yp))

FD_yReg2=[tp;yp;yReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,ayr2);(yReg2(hmp,trafp,
tmp,wmp,ayr2)-yp)]'
figure(104)
plot(FD_yReg2(:,1),
FD_yReg2(:,2), 'or', FD_yReg2(:,1), FD_yReg2(:,3), '+r'), grid
title('y- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 2')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(y)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')
%##### FOR Z Dir
zr1=[ones(size(z')) hmt' traft' tmt' wmt'];
azr1=zr1\z';

```

```

zReg1=inline('azr1(5)*wmt+azr1(4)*tmt+azr1(3)*traft+azr1(2)
*hmt+azr1(1)', 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'azr1')
max-
errzReg1=max(abs(zReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,azr1)-zp))

FD_zReg1=[tp;zp;zReg1(hmp,trafp,tmp,wmp,azr1);(zReg1(hmp,trafp,
tmp,wmp,azr1)-zp)]'
figure (105)
plot( FD_zReg1(:,1),
FD_zReg1(:,2), 'ob', FD_zReg1(:,1), FD_zReg1(:,3), '+b'), grid
title('z- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 1')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')

zr2=[ones(size(z')) hmt' traft' tmt' wmt'
(hmt.*traft)' (hmt.*tmt)' (hmt.*wmt)' (hmt.^2)'...
(traft.*tmt)' (traft.*wmt)' (traft.^2)'
(tmt.*wmt)' (tmt.^2)' (wmt.^2)'];
azr2=zr2\z';

zReg2=inline('azr2(15)*(wmt.^2)+azr2(14)*(tmt.^2)+azr2(13)*
(tmt.*wmt)+azr2(12)*(traft.^2)+azr2(11)*(traft.*wmt)+azr2(10)
*(traft.*tmt)+azr2(9)*(hmt.^2)+azr2(8)*(hmt.*wmt)+azr2(7)
*(hmt.*tmt)+azr2(6)*(hmt.*traft)+azr2(5)*wmt+azr2(4)*tmt+azr2(3)
*traft+azr2(2)*hmt+azr2(1)'...
, 'hmt', 'traft', 'tmt', 'wmt', 'azr2')
maxerrzReg2
=max(abs(zReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,azr2)-zp))
FD_zReg2=[tp;zp;zReg2(hmp,trafp,tmp,wmp,azr2);(zReg2(hmp,trafp,
tmp,wmp,azr2)-zp)]'
figure (106)
plot( FD_zReg2(:,1),
FD_zReg2(:,2), 'ob', FD_zReg2(:,1), FD_zReg2(:,3), '+b'), grid
title('z- координаты прогнозирования с использо-
ванием метода регрессии 2')
xlabel('Время (минуты)'), ylabel('смещения
(z)'), legend('Реальные данные', 'Оценка')
end

otherwise
disp('Not Valid Input')
end

```

## Ж.3 Результаты прогнозирования различными моделями для x-смещений

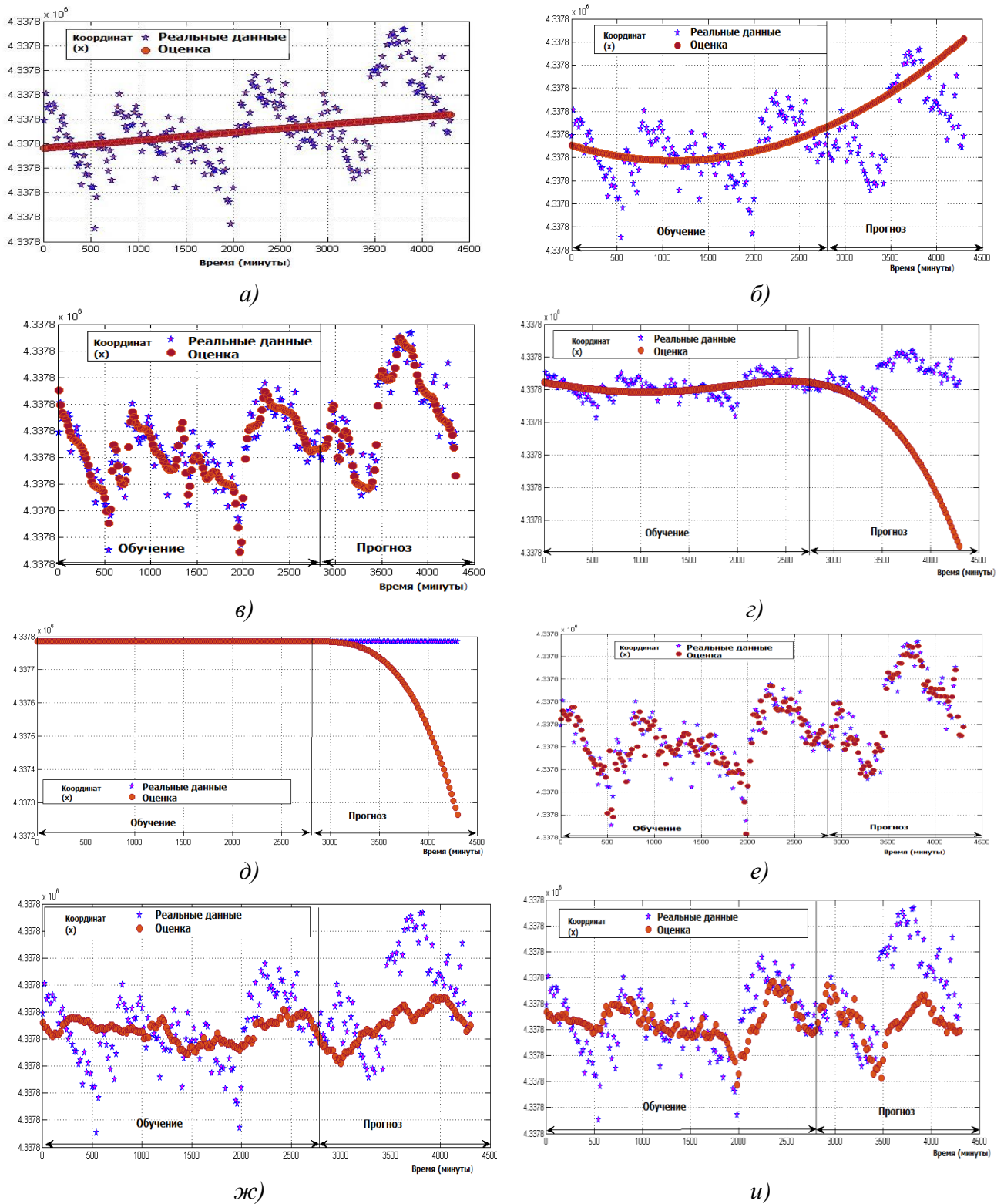


Рисунок Ж.1 – Результаты прогнозирования для x- смещений с использованием:  
 а) линейного уравнения; б) многочлена второй степени; в) кинематической нейронной сети; г) многочлена четвертой степени; д) кубического сплайна; е) динамической нейронной сети; ж) метода регрессии первой степени; и) метода регрессии второй степени

ПРИЛОЖЕНИЕ И  
(обязательное)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕТЬ ЕГИПТА

Существующая Египетская геодезическая сеть, создание которой восходит к первой декаде двадцатого века, была изучена и регулируется в двух и трех измерениях несколькими исследователями. GPS широко используется в последнее десятилетие. Координаты многих триангуляций станций точно определяются во Всемирной геодезической системе 1984г. (WGS-84). Первоначальный вариант геодезической горизонтальной сети управления Египта состоял из двух основных сетей: сети 1 и сети 2 на Коул, 1944.

Координаты доступных станций в WGS-84 намного более точные, чем соответствующие координаты в местной системе координат. Точность координат в координатной системе компании HARN 1: 10000000.

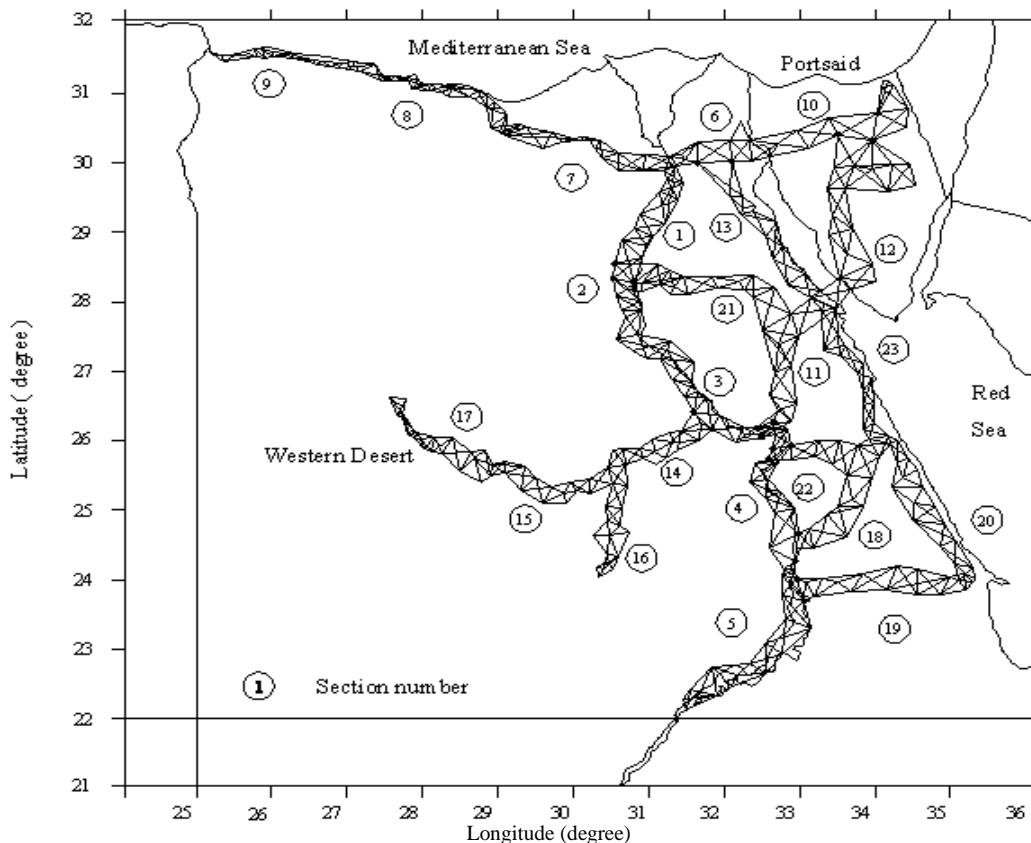


Рисунок И.1– Египетские сети триангуляции первого порядка

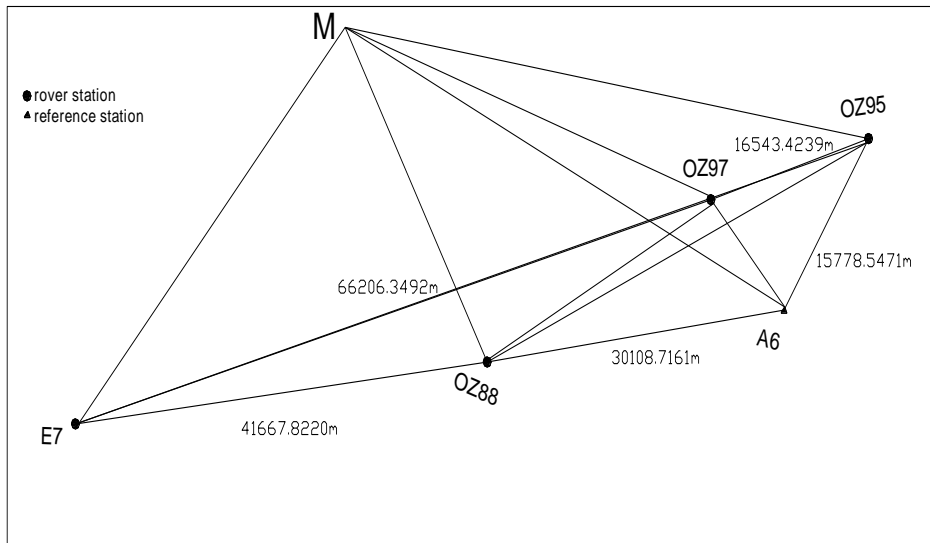


Рисунок И.2 – Доступные точки данных

Это станции, определенные с высокой точностью (ссылка Network (HARN)).

Таблица И.1 – Опубликованные HARN координаты точек сети

Пункты	Е, м	Н, м	Н, м
OZ88	$309898,555 \pm 0,002$	$3303157,7225 \pm 0,004$	$137,729 \pm 0,004$
A6 (база)	340016,941	3304353,508	134,981
E7	$268216,447 \pm 0,005$	$3302823,793 \pm 0,004$	$230,875 \pm 0,005$
OZ97	$333921,048 \pm 0,002$	$3323219,264 \pm 0,005$	$219,776 \pm 0,005$
OZ95	$350276,566 \pm 0,002$	$3328942,016 \pm 0,004$	$230,527 \pm 0,004$